

# Von der Faser zum Haus

Das Potential von gefalteten Wabenplatten  
aus Papierwerkstoffen in ihrer architektonischen Anwendung





## Kurzfassung

Der vorliegende Text beschreibt die intensive Erforschung von Wabenplatten aus Papierwerkstoffen, die durch Faltprozesse neue räumliche Zustände einnehmen können und somit ihr ursprüngliches Anwendungsspektrum erweitern. Die gezeigten Lösungsansätze bewegen sich dabei im Spannungsfeld von Architektur und Ingenieurbau, denn die gefalteten Bauteile sind nicht nur äußerst tragfähig sondern besitzen auch eine ästhetische Form. Die entwickelten Verfahren und Konstruktionen werden auf einem hohen architektonischen Niveau präsentiert und mit einfachen ingenieurtechnischen Methoden verifiziert. Zur Lösungsfindung werden geometrische Verfahren ebenso angewendet wie konstruktive Faustformeln und Recherchen aus Architektur und Forschung.

Der Fokus der Arbeit liegt auf der Untersuchung von Faltungen in Wabenplatten. Während der Auseinandersetzung mit der Thematik erschienen jedoch viele weitere Aspekte als sehr interessant und bearbeitungswürdig. Als theoretische Grundlage dieser Arbeit werden deshalb die geschichtliche Entwicklung und die gesellschaftliche Bedeutung von Papier und Papierwerkstoffen analysiert und deren Produktionsprozesse beleuchtet. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine Einordnung des Potentials und der Bedeutung des Werkstoffs Papier. Der Kontext der Arbeit wird dadurch gestärkt und führt zu interessanten zukünftigen Forschungsansätzen.

Intensive Untersuchungen widmen sich der geometrischen Bestimmung von Faltungen in Wabenplatten aus Papierwerkstoffen sowie deren Manifestation als konstruktive Bauteile. Auch die statischen Eigenschaften der Elemente und ihr Konstruktionspotential werden erforscht und aufbereitet. Wichtige Impulse aus Forschung und Technik fließen in die Recherche der Arbeit ein und erlauben die Verortung der Ergebnisse im architektonischen Kontext. Versuchsreihen und Materialstudien an Prototypen belegen die Ergebnisse virtueller und rechnerischer Studien. Konzepte zur parametrischen Berechnung und Visualisierung der Forschungsergebnisse werden präsentiert und zeigen zukunfts-fähige Planungshilfen für die Industrie auf. Etliche Testreihen zu unterschiedlichsten Abdichtungskonzepten führen zur Realisierung eines sehenswerten Experimentalbaus. Er erlaubt die dauerhafte Untersuchung der entwickelten Bauteile unter realistischen Bedingungen und bestätigt deren Leistungsfähigkeit. Dadurch wird nicht nur ein dauerhaftes Monitoring und eine Evaluierung der Leistungsdaten möglich sondern es wird auch der sichtbare Beweis erbracht, dass mit Papierwerkstoffen effiziente und hochwertige Architekturen zu realisieren sind, welche das enorme gestalterische Potential von gefalteten Wabenplatten ausnutzen.



# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis . . . . .	iii
Tabellenverzeichnis . . . . .	v
<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
Motivation . . . . .	2
Ziele und themenrelevante Fragestellungen . . . . .	3
<b>1 Papier und Papierprodukte</b>	<b>5</b>
1.1 Entstehungsgeschichte . . . . .	5
1.2 Produktvielfalt . . . . .	8
1.3 Kulturelle und technische Bedeutung . . . . .	11
1.4 Eigenschaften . . . . .	14
1.4.1 Physikalische, mechanische und chemische Attribute . . . . .	14
1.4.2 Optische Eigenschaften . . . . .	17
1.4.3 Haptische Eigenschaften . . . . .	18
1.5 Produktion . . . . .	20
1.5.1 Grundlagen und Rohstoffe der Papierproduktion . . . . .	20
1.5.2 Produktionsablauf . . . . .	22
1.5.3 Oberflächenbehandlung und Weiterverarbeitung . . . . .	23
1.6 Produkte . . . . .	27
1.6.1 Papier . . . . .	28
1.6.2 Pappe . . . . .	29
1.6.3 Karton . . . . .	30
1.6.4 Mischformen . . . . .	31
<b>2 Wellpappe und Wellpappenprodukte</b>	<b>33</b>
2.1 Entstehungsgeschichte . . . . .	33
2.2 Kulturelle und technische Bedeutung . . . . .	34
2.3 Eigenschaften . . . . .	34
2.3.1 Physikalische, technische und chemische Attribute . . . . .	35
2.3.2 Optische Eigenschaften . . . . .	37
2.3.3 Haptische Eigenschaften . . . . .	37
2.3.4 Wellenarten . . . . .	38
2.3.5 Wellenformen . . . . .	40
2.3.6 Wellenprofile . . . . .	41
2.3.7 Wellenrichtungen . . . . .	43
2.3.8 Verbindung der Papierlagen . . . . .	43
2.4 Produktion . . . . .	45
2.4.1 Grundlagen und Rohstoffe der Wellpappenproduktion . . . . .	45
2.4.2 Produktionsablauf . . . . .	46
2.5 Produkte . . . . .	48
2.5.1 Sandwichstrukturen . . . . .	49
2.5.2 SWAP-Wabenplatten . . . . .	56

<b>3</b>	<b>Forschungsergebnisse</b>	<b>59</b>
3.1	Forschungsfokus: Papiere . . . . .	59
3.1.1	Recherche zum Stand von Wissenschaft und Technik . . . . .	60
3.1.2	Papiere der SWAP-Wabenplatten . . . . .	62
3.1.3	Messung der Grammaturen . . . . .	65
3.1.4	Zugfestigkeit der SWAP-Papiere . . . . .	67
3.2	Forschungsfokus: Wellpappe und Wabenplatten aus Wellpappe . . . . .	72
3.2.1	Recherche zum Stand von Wissenschaft und Technik . . . . .	72
3.2.2	Untersuchungen von Wabenplatten aus Wellpappe . . . . .	77
3.2.3	Druckfestigkeit . . . . .	78
3.2.4	Biegesteifigkeit . . . . .	86
3.3	Forschungsfokus: Faltungen . . . . .	91
3.3.1	Begriffsdeutung und Themenabgrenzung . . . . .	92
3.3.2	Faltvorgänge . . . . .	92
3.3.3	Winkelbeziehungen . . . . .	94
3.3.4	Analysesparameter . . . . .	95
3.3.5	Statische und reversible Falten . . . . .	96
3.3.6	Faltungen in Papieren . . . . .	97
3.3.7	Faltungen in SWAP-Wabenplatten . . . . .	98
3.3.8	Partielle Decklinerentfernung und resultierender Winkel . . . . .	106
3.4	Forschungsfokus: Bauteile aus gefalteten Wabenplatten . . . . .	108
3.4.1	Entwicklung von Geometrien für Stützen . . . . .	110
3.4.2	Querschnittsform: gleichseitiges Dreieck . . . . .	113
3.4.3	Querschnittsform: Rechteck oder Quadrat . . . . .	120
3.4.4	Entwicklung von Geometrien für Träger und Decken . . . . .	124
3.4.5	Zusammenfassung und Bewertung . . . . .	129
3.5	Forschungsfokus: Abwicklung und Parametrisierung . . . . .	131
3.5.1	Abwicklung eines einfachen Trägers . . . . .	131
3.5.2	Ausgangssituation . . . . .	131
3.5.3	Rechnerische Formelherleitung . . . . .	133
3.5.4	Ergebnisse . . . . .	134
3.5.5	Digitale Anwendung der Rechenschemas . . . . .	135
3.5.6	Abwicklung eines Trägers mit Zwischensteg . . . . .	142
<b>4</b>	<b>Anwendung der Forschungsergebnisse</b>	<b>149</b>
4.1	Recherche zum Stand von Wissenschaft und Technik . . . . .	149
4.1.1	Analyseparameter . . . . .	150
4.1.2	Architekturbeispiele . . . . .	151
4.1.3	Kategorisierung . . . . .	159
4.2	Testreihen zur Entwicklung umsetzbarer Baudetails . . . . .	161
4.2.1	Tragfähigkeit von Bauteilen aus gefalteten Wabenplatten . . . . .	161
4.2.2	Wasserbeständigkeit von Fassadenelementen aus Wabenplatten . . . . .	168
4.3	Konzeption des Projektes <i>OpenSource: Cardboard</i> . . . . .	175
4.3.1	Entwurfsparameter . . . . .	175
4.3.2	Aufbau und Struktur . . . . .	176
4.3.3	Fundamentierung und Aufbau des Bodens . . . . .	177
4.3.4	Rahmensystem . . . . .	178
4.3.5	Fassadenaufbau . . . . .	182
4.3.6	Stirnseiten des Pavillons . . . . .	183
4.4	Monitoring . . . . .	184
4.4.1	Jahreszeitliche Dimensionsänderung . . . . .	184
4.4.2	Dichtigkeit der Fassade . . . . .	185

4.4.3	Reaktion des Gebäudes auf Klimawechsel . . . . .	186
4.5	Bewertung des Experimentalbaus . . . . .	193
4.5.1	Beurteilung des Dämmverhaltens . . . . .	193
4.5.2	Optimierungsvorschläge . . . . .	194
4.5.3	Einordnung nach ökologischen Gesichtspunkten . . . . .	195
4.5.4	Ausblick und Ansätze für weiterführende Arbeiten . . . . .	196
<b>Schautafeln</b>		<b>197</b>
<b>Tabellen</b>		<b>203</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>213</b>

## Abbildungsverzeichnis

1.1	Cai Lun, Verfasser der ersten belegten Beschreibung der Papierfertigung . . . . .	6
1.2	Erste Darstellung der Papierproduktion in Europa . . . . .	7
1.3	Japanisches Papiergewand . . . . .	12
1.4	Muster zur Papierbespannung westchinesischer Fensterrahmen . . . . .	13
1.5	Grammaturbereich von Papier, Karton und Pappe . . . . .	30
2.1	Wellpappen-Arten . . . . .	38
2.2	Wellenformen . . . . .	40
2.3	Attribute der Sinus-Wellenform . . . . .	41
2.4	Patent (EP0765216B1) - Kombination verschiedener Wellenprofile . . . . .	42
2.5	Wellenrichtung . . . . .	43
2.6	Single Facer und Leimwerk der Wellpappenmaschine . . . . .	46
2.7	Heiz- und Zugpartie der Wellpappenmaschine . . . . .	47
2.8	Deckungsgleiche und rechtwinklig versetzte Anordnung der Wellpappe . . . . .	48
2.9	Vergleich von Integralbauweise und Differentialbauweise . . . . .	50
2.10	Varianten der Kernstruktur . . . . .	51
2.11	Honigwaben-Kerne mit unterschiedlichen Höhen und Weiten . . . . .	52
2.12	SwissCell-Wabenplatte und Universal World House . . . . .	53
2.13	Foldcore-Wabe im Normalzustand und nach Verbiegung . . . . .	54
2.14	Leichtbauplatte Conbou mit Kern aus Bambusrohr-Abschnitten . . . . .	55
2.15	SWAP-Wabe mit und ohne Kaschierung . . . . .	56
2.16	Durchsicht einer SWAP-Wabe . . . . .	57
2.17	Schema der Produktionsschritte der SWAP-Wabenplatten . . . . .	58
3.1	Rissproben an fünf Testpapieren . . . . .	63
3.2	Probekörper und Zugversuch . . . . .	68
3.3	Spannungs-Dehnungs-Diagramm – Zugversuche . . . . .	69
3.4	Versuchsanordnung Druckversuch . . . . .	80
3.5	Druckversuch 1 . . . . .	81
3.6	Druckversuch 2 . . . . .	82
3.7	Druckversuch 3 . . . . .	83
3.8	Spannungs-Stauchungs-Diagramm – alle Druckversuche im Vergleich . . . . .	84
3.9	Biegeversuch . . . . .	88
3.10	Spannungs-Stauchungs-Diagramm – Biegeversuche . . . . .	89
3.11	Vergleich der Biegebelastbarkeiten . . . . .	90
3.12	Klassifikation der Winkelspannen bei Faltungen . . . . .	95
3.13	Verhältnis von Materialstärke zur Faltbarkeit . . . . .	98

3.14	Antiklastische Faltung einer Wabenplatte mit 5mm Stärke . . . . .	99
3.15	Antiklastische Faltung einer Wabenplatte mit 15mm Stärke . . . . .	100
3.16	Nulllinie in einem homogenen Werkstoff . . . . .	101
3.17	Nulllinie in einer SWAP-Wabenplatte . . . . .	101
3.18	Stauchung und Dehnung bei Faltung . . . . .	102
3.19	Faltung ohne Entfernung des Deckliners . . . . .	103
3.20	Faltung mit partieller Entfernung des Deckliners . . . . .	104
3.21	Parallelfaltung an beiden Probekörpern . . . . .	105
3.22	Zusammenhänge zwischen Bogenmaß, Radius Außen- und Innenwinkel. . . . .	106
3.23	Stützenquerschnitt: Idealform Kreis und Annäherung . . . . .	110
3.24	Stützenquerschnitt 12-Eck . . . . .	111
3.25	Stützenquerschnitt: Varianten . . . . .	114
3.26	Stützenquerschnitt: Gleichseitiges Dreieck . . . . .	116
3.27	Stützenquerschnitt: Ausschnitt . . . . .	117
3.28	rechteckiger Stützenquerschnitt . . . . .	120
3.29	Detail eines rechteckigen Stützenquerschnitts . . . . .	121
3.30	Varianten der Stützenquerschnitte als trianguliertes Profil . . . . .	122
3.31	Trägerquerschnitte mit Öffnung zum Raum . . . . .	125
3.32	Varianten der Trägerquerschnitte . . . . .	126
3.33	Verbund aus Träger und ebener Deckenplatte . . . . .	127
3.34	Verbund aus Träger und gefalteter Deckenplatte . . . . .	128
3.35	Bauteilabwicklung . . . . .	132
3.36	Excel-Tabelle zur Berechnung der Fräsbereiche . . . . .	135
3.37	Excel-Tabelle mit alternativen Eingaben . . . . .	136
3.38	Ansicht der gesamten Grasshopper-Definition . . . . .	137
3.39	Grasshopper-Definition: Eingabe und Formelberechnung . . . . .	138
3.40	Grasshopper-Definition: Kontrollfelder und Vektorlinien . . . . .	139
3.41	Grasshopper-Definition: hälftige Abwicklung und Spiegelung . . . . .	140
3.42	Darstellung in Rhinoceros . . . . .	141
3.43	Abwicklung der Wabenplatte . . . . .	142
3.44	Rahmenquerschnitt . . . . .	142
3.45	Plattenausschnitte zur Erzeugung des rechtwinkligen Eckprofils . . . . .	143
3.46	Eckprofil . . . . .	144
3.47	Isometrie und Zusammenhänge der Winkel . . . . .	145
3.48	Pyramidendarstellung . . . . .	145
3.49	Zusammenhang zwischen Winkel und Schnittkante . . . . .	147
3.50	erweiterte Excel-Tabelle . . . . .	148
4.1	Kategorisierung von Architekturen aus Papierwerkstoffen . . . . .	150
4.2	Packed Pavilion . . . . .	151
4.3	Cardboard House . . . . .	152
4.4	L'ilot carton . . . . .	153
4.5	Cardboard Banquet . . . . .	154
4.6	Instant Homes . . . . .	155
4.7	West Borough Primary School . . . . .	156
4.8	Foldlife Pavilion . . . . .	157
4.9	Paper log Houses . . . . .	158
4.10	Lastabtragende Papierwerkstoffe . . . . .	159
4.11	Bauklimatisch wirksame Papierwerkstoffe . . . . .	160
4.12	Belastungstest an einem hälftigen Rahmen . . . . .	162
4.13	Aufbau der Versuchsanordnung . . . . .	163
4.14	Biegeverformung eines Rahmen . . . . .	164

4.15	reduzierte Windbelastung auf einen Rahmen . . . . .	166
4.16	maximale Windbelastung auf einen Rahmen . . . . .	167
4.17	Abdichtung von Proben mit PVC-Folie . . . . .	168
4.18	Versuche zur Überprüfung der Wasserdichtigkeit . . . . .	170
4.19	Spaltüberbrückung mittels Materialaufdopplung und Silikonfuge . . . . .	171
4.20	Auftrag der Zweikomponenten-Dichtschlämme . . . . .	172
4.21	Versuche der Spaltüberbrückung . . . . .	173
4.22	Spaltüberbrückung mit Dichtschlämme und Silikon . . . . .	174
4.23	Rahmensystem und Beplankung . . . . .	176
4.24	Schnitt durch den Bereich des Auflastfundaments . . . . .	177
4.25	Schema des Faltprozesses . . . . .	179
4.26	Bearbeitung der Wabenplatten . . . . .	179
4.27	Montage eines Knotenpunktes . . . . .	180
4.28	Vorfertigung der Knotenpunkte . . . . .	181
4.29	Aufbau der hinterlüfteten Fassade . . . . .	182
4.30	Auftrag der Dichtschlämme . . . . .	183
4.31	Risse im Dichtmaterial . . . . .	185
4.32	Messgeräte für Temperatur und Luftfeuchtigkeit . . . . .	186
4.33	Vergleich von vier gemessenen Luftfeuchtwerten . . . . .	188
4.34	Gegenüberstellung von Außen- und Innentemperatur . . . . .	189
4.35	Wärmeﬂussplatte zur Erfassung des Wärmestroms . . . . .	190
4.36	Auswertung der Messintervalle . . . . .	191
4.37	Thermographieaufnahmen . . . . .	193
4.38	Ansicht der Südfassade . . . . .	197
4.39	Ansicht der Nordfassade . . . . .	198
4.40	Ansicht der Westfassade . . . . .	198
4.41	Innenraum mit Folienfassade . . . . .	199
4.42	Die Struktur des Tragwerks . . . . .	199
4.43	Der Experimentalbau im Winter . . . . .	200
4.44	Stirnseiten des Experimentalbaus . . . . .	201
4.45	Seitenansicht des Experimentalbaus . . . . .	201
4.46	Längs- und Querschnitt sowie Grundriss des Experimentalbaus . . . . .	202

## Tabellenverzeichnis

4.1	Wellenprofile laut DIN 55468-1:2004-08 . . . . .	203
4.2	Kennwerte von fünf Decklinerpapieren . . . . .	203
4.3	Soll- und Ist-Grammaturen von fünf Decklinerpapieren . . . . .	204
4.4	Breitenbezogene Bruchkraft von Decklinerpapieren . . . . .	204
4.5	Breitenbezogene Bruchdehnung von Decklinern . . . . .	205
4.6	Streifenbreite der Decklinerentfernung an n-Ecken . . . . .	205
4.7	Zellinhalte der Exceltabelle - Bauteildimensionen . . . . .	206
4.8	Zellinhalte der Exceltabelle - Schenkel- und Schnittwinkel . . . . .	206
4.9	Verformung eines horizontalen Trägers infolge maximaler Schneelast . . . . .	207
4.10	Verformung eines Rahmens infolge reduzierter Windlast . . . . .	207
4.11	Änderung von Länge, Breite und Höhe des Experimentalbaus . . . . .	208
4.12	U-Werte von drei Messintervallen . . . . .	208





# Einleitung

Seit seiner Erfindung vor über zweitausend Jahren fasziniert Papier die Menschen aufgrund seiner vielfältigen Eigenschaften und seiner unzähligen Anwendungsgebiete. Es gehört zu den wichtigsten Erfindungen der Menschheit, dient der gesellschaftlichen Entwicklung und ist aus dem alltäglichen Leben nicht mehr wegzudenken. In nahezu allen Bereichen sind Papiere und Papierprodukte zu finden. Dem Literaten dient es als Übermittler geschriebener Gedanken, dem Zeichner als Leinwand ästhetischer Manifestationen und dem Architekten als bildlicher Träger gestalterischer Visionen. Besonders faszinieren die so unterschiedlichen Eigenschaften, denn Papier ist stabil und zugleich fragil, weich und doch scharfkantig, erhaben und glatt im selben Moment. Dabei sind nicht nur die optischen und haptischen Eigenschaften interessant sondern auch die Wandlungsfähigkeit des Materials. Die japanische Tradition des Papierfaltens zeigt besonders gut, dass in Papier ein großes Potential der Form- und damit der Funktionsveränderung steckt. Faltexperimente führen nicht nur zur Änderung der ästhetischen Erscheinungsformen sondern auch zu verbesserten statischen Eigenschaften. Papier ist demnach durchaus als konstruktives Element einsetzbar. Eine interessante Fragestellung liegt in einer möglichen Skalierbarkeit von Faltpinzipien, also der Übertragung dieser Techniken von dünnen Papierbögen auf stärkere Papiere oder Wellpappen. Deshalb liegt die Annahme nahe, dass die Einsatzgebiete von Papierwerkstoffen bei *Bedruckung* und *Verpackung* längst nicht erschöpft sind. Das hier versteckte Potential ist nur durch modellhafte Studien und Experimente zu bergen.

Bereits im Jahr 1908 beschreibt Leonhard grundlegende Theorien über Gestaltungsprinzipien und Formzusammenhänge von gefalteten Objekten aus Pappe. Dort postuliert er: “A designer must go through a certain process of thinking, although often unconscious of the fact, before forming a definite conception of the object to be constructed.” Ein gefaltetes Objekt kann demnach nicht ohne eine logische Konzeption entstehen.<sup>1</sup> Diverse temporäre Architekturen zeigen den kreativen und erfolgreichen Einsatz von Papierwerkstoffen als konstruktive Elemente. Sie fordern den interessierten Forscher geradezu heraus, langlebige Produkte mit hoher Ästhetik und einer Resistenz gegen Umwelteinflüsse aus diesem unterschätzten Material zu entwickeln. Das Papierprodukt Wellpappe hat sich als effizientes, strapazierfähiges und kostengünstig herzustellendes Material etabliert. Mehrschichtige Platten erlauben immer größere Einsparpotentiale bei den verbrauchten Rohstoffen und der Produktionsenergie. Es steht weltweit in großem Umfang zur Verfügung und lässt sich sehr kostengünstig produzieren. Unzählige wissenschaftliche Forschungen haben die Belastbarkeit des Materials und sein Verhalten unter verschiedensten physikalischen und chemischen Einflüssen zum Thema. Wellpappe stellt deshalb eine wertvolle Ressource zur Lösung konstruktiver Herausforderungen dar.

---

<sup>1</sup>Leonard, R. J.: Manual of Cardboard Construction, 1908, S.8. [Leo08]

## Motivation

So gut das Renommee des Materials im Bereich Verpackung auch sein mag, konnte es im Architektursektor noch keinen nennenswerten Fuß fassen. Dies liegt einerseits an dem nicht zu unterschätzenden Nachteil der Empfindlichkeit gegenüber Feuchte als auch die mangelnde gesellschaftliche Akzeptanz des vermeintlich günstigen Materials. Der Architekt Shigeru Ban konnte schon einige Gebäude mit Tragelementen aus Pappe verwirklichen, doch beruhen diese fast ausschließlich auf beschichteten Pappröhren, welche ihre Stabilität vor allem aus ihrer hohen Dichte generieren. Wenige Projekte beziehen sich auf das Plattenmaterial Wellpappe oder daraus hergestellte Sandwichelemente. Die zahlreichen positiven Attribute von Papierwerkstoffen werden in der gesellschaftlichen Wahrnehmung nur allzu häufig von wenigen nachteiligen Eigenschaften überschattet. Dimitris Kottas postuliert dazu: "The use of cardboard as a full-size building component has largely been ignored by the housing industry. Common perceptions of poor weathering capability, weak structural strength, fire vulnerability and lack of household security have excluded this material from construction options."<sup>2</sup> Diese Sichtweise ist der Grund für das verkannte Potential des Werkstoffs im Architektursektor und hier setzt die vorliegende Arbeit an. Dabei sind zunächst die bekannten Denkmuster zu verlassen, wie es beispielsweise Konrad Wachsmann versucht hat. Bereits 1953 entwickelte er ein modulares Wandsystem mit Papierkern.<sup>3</sup> Die innovative Strahlkraft dieser Idee vermochte das Papier jedoch nicht aus seiner festgelegten Widmung befreien. Deshalb werden auch heute noch Begriffe wie *günstig*, *schwach*, *empfindlich* oder *kurzlebig* verwendet, um Papierprodukte im architektonischen Kontext zu beschreiben. Diese Position ist zu hinterfragen und ihr ist mit innovativen Lösungsvorschlägen zu begegnen.

Die Arbeiten von Weinand<sup>4</sup>, Hull<sup>5</sup> und Lang<sup>6</sup> haben einen großen Einfluss auf die Forschung von Faltungen. Auch für die hier vorliegende Arbeit dienen derartige Ansätze als wertvolle Inspirationsquelle. Dabei besitzen die Forschungsobjekte weitaus höhere Materialstärken als die untersuchten Originale aus Papier. Das Faltungen dabei bestimmten Einschränkungen unterliegen, erhöht den Reiz an der Erforschung dieses Metiers. Die hier präsentierten Ergebnisse zeigen, dass Papierwerkstoffe über beispiellose Charakteristika verfügen, sofern sie vor Feuchtigkeit und Feuer geschützt werden. Dieser Schutz ist häufig sehr leicht zu realisieren und bietet Elementen aus Papier ungeahnte Möglichkeiten der Wirkungsentfaltung. Vor allem die statische Leistungsfähigkeit von Papierwerkstoffen ist im Verhältnis zum Materialeinsatz beachtlich. Die beschriebenen Faltungen wirken dabei weit mehr als Transformatoren der Form – sie ertüchtigen die Struktur und verändern die Widmung des Objekts. Richtig eingesetzt, senken Papierprodukte den Materialeinsatz alternativer Baustoffe und den Energieverbrauch zur Herstellung von Gebäuden. Deshalb scheint es nur logisch, die Leistungsreserven dieser Produkte zu untersuchen und ihren Einsatz zu fördern.

---

<sup>2</sup>Kottas, D.: New Trends in Microarchitecture, Linksbooks, 2014, S. 296. [Kot14]

<sup>3</sup>Wachsmann, K.: Wendepunkt im Bauen, Verlag der Kunst Dresden, 1989, S. 209. [Wac89]

<sup>4</sup>Weinand, Y.: Origami - Folded Plate Structures, Architecture Folding patterns, 2008[Wei08]

<sup>5</sup>Hull, T.: Solving Cubics With Creases: The Work of Beloch and Lill, 2011. [Hul11]

<sup>6</sup>Lang, R.: Origami and Geometric Constructions, 2010. [Lan10]

## **Ziele und themenrelevante Fragestellungen**

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt in der Analyse und Bewertung von Faltungen, welche in Wabenplatten aus Papierwerkstoffen erzeugt werden können. Die daraus entstehenden Bauteile werden auf ihre Tragfähigkeit als Bestandteile eines Gebäudes überprüft. Ziel ist die effiziente Kombination lastabtragender und bauklimatisch wirksamer Papierwerkstoffe in einem Architekturprojekt. Der damit einhergehende reduzierte Einsatz alternativer Materialien und die Etablierung neuer Entwurfsstrategien auf Basis gefalteter Wabenplatten aus recycelten Papierwerkstoffen wird dabei ebenso beleuchtet wie die Implementierung einer ästhetischen Bewertungskomponente.

Unzählige temporäre Projekte aus Papierwerkstoffen zeigen das gestalterische und konstruktive Potential von Wellpappe und Wabenplatten aus Papierwerkstoffen. Zeitgleich offenbaren diese Projekte jedoch auch die Problematik des Versagens unter Feuchteeinwirkung. Diese Zusammenhänge führten zur Definition von zehn Leitfragen, die in dieser Arbeit einer tiefergehenden Betrachtung unterzogen werden.

1. Welche Optionen zur Faltung in Wabenplatten existieren?
2. Wie sind Faltungen in Wabenplatten rechnerisch, geometrisch und simulatorisch zu erfassen und zu bewerten?
3. Unter welchen Voraussetzungen eignen sich gefaltete Wabenplatten aus Papierwerkstoffen als dauerhaft wirkende, lastabtragende architektonische Bauteile?
4. Wie sind lastabtragende und bauklimatisch wirksame Papierwerkstoffe so in einem Bauwerk zu kombinieren, dass eine effiziente und materialgerechte Konstruktion entsteht?
5. Wie ist ein Gebäude im Ganzen und seine konstruktiven Bauteile im Detail zu gestalten, um diese Werkstoffe sinnvoll und ressourcenschonend einzusetzen?
6. Welche Vorteile bieten Bauteile aus gefalteten Wabenplatten gegenüber klassischen Konstruktionselementen?
7. Welche Schutzmaßnahmen gegenüber Nässe und äußeren Einflüssen sind konstruktiv und technisch sinnvoll umsetzbar?
8. Welche der vorhandenen digitalen Planungs- und Produktionswerkzeuge können für die Entwicklung und Produktion herangezogen werden?
9. Was für Möglichkeiten bestehen, um gefaltete Wabenplatten am Markt zu präsentieren und als anerkannte Baustoffe zu etablieren?
10. Welches Optimierungspotential kann während der Erforschung dieser Elemente herausgearbeitet und zur Anwendung empfohlen werden?



# 1 Papier und Papierprodukte

Kaum ein von Menschenhand hergestellter Werkstoff kann auf eine derartig lange Geschichte blicken und so vielfältige Einsatzmöglichkeiten vorweisen wie das Papier. Die positiven Eigenschaften dieses Materials beflügeln die Phantasie der Menschen seit jeher. Seine ursprüngliche und weltbewegende Bedeutung als *Beschreibstoff* zur Archivierung von Schrift und Bild hat es dabei nicht verloren. Im Zuge der industriellen Entwicklung kamen immer neue Anwendungsgebiete hinzu und machten das Papier im Laufe der Zeit zu einem universellen Ausgangsmaterial für die vielfältigsten Produkte. Zunächst suchten die Menschen ein leichtes Material, das einfach archiviert werden konnte und als Ersatz für Marmor-, Bronze-, Holz-, Ton- oder Wachstafeln zum Einsatz kam. Dabei wird das grundlegende Prinzip der *Zerfaserung* eines Ausgangsmaterials mit anschließender Zusammensetzung zu einem neuen Beschreibstoff angewendet. Diese Herangehensweise ist für viele Zivilisationen an den unterschiedlichsten Orten der Erde nachgewiesen. Diverse gefundene “Faserträger mit unterschiedlichen Eigenschaften...” beweisen dies.<sup>1</sup> Die drei wichtigsten sind der *Papyrus* im Mittelmeerraum, das *präkolumbianische Papier* auf dem südamerikanischen Kontinent und Papiere, die im fernen Osten und China entstanden. Letztgenannte hat den wichtigsten Einfluss auf die spätere weltweite Papierproduktion genommen.

## 1.1 Entstehungsgeschichte

Die Herstellung von Papier und dessen Nutzung als als Beschreibstoff scheint schon weit vor der christlichen Zeitrechnung in China bekannt gewesen zu sein. Einige themenrelevante Publikationen bekräftigen diese Behauptung, können jedoch keine eindeutigen Beweise anführen. Verschiedene Funde in Zentralasien legen den Schluss nahe, dass die Papierentwicklung parallel an verschiedenen Orten stattgefunden haben muss. Ungesicherte Indizien führen zu einem Chinesen namens *Han Hin*, der im 3. Jahrhundert v. Chr. entdeckte, dass sich Reste von Seidenkokons in Waschtrommeln verklumpen und als Füllstoffe für Bekleidung genutzt werden können.<sup>2</sup> Zunächst blieb diese Anwendung auf diesen Bereich beschränkt. Im 1. Jahrhundert v. Chr. wurde damit begonnen, diese verfilzten Polster auf Gegenstände wie Bambustafeln zu applizieren um sie anschließend zu beschreiben. Diese Techniken wurden immer weiter verfeinert und führten zur gezielten Herstellung von Beschreibstoffen, die eine höhere Stabilität aufwiesen und ohne Trägermaterial auskommen. Die erste sicher dokumentierte Beschreibung der Papierfertigung stammt von *Cai Lun* (auch: *Thsai Lun*), einem Beamten der Behörde für Fertigung von Instrumenten und Waffen am chinesischen Kaiserhof der Han-Dynastie. Er beschrieb im Jahr 105 n. Chr. erstmalig die Herstellung von Papier als Prozess des Zerstampfens und

---

<sup>1</sup>Asunción, J.: Das Papierhandwerk, S. 10. [Asu03]

<sup>2</sup>ebenda, S. 14. [Asu03]

Kochens von Pflanzenfasern, die anschließend durch ein Sieb abgeschöpft und getrocknet wurden. Cai Lun<sup>3</sup> wird die erste nachweisbare schriftliche Quelle zur Papierherstellung zugeschrieben, doch kommt er nicht als Erfinder des Papiermachens infrage, denn nachweislich wurde bereits im 1. Jahrhundert v. Chr. Papier hergestellt.<sup>4</sup> Dennoch gilt er in der chinesischen Geschichtsschreibung als *Schutzpatron der Papiermacher* und erfährt auch heute noch eine große Verehrung.<sup>5</sup> Tsuen-Hsui postulierte, dass die Erfindung von Papier nicht durch einen einzelnen Geistesblitz entwickelt wurde. Vielmehr führten die zufällig mit Regenwasser in Berührung gekommenen Pflanzen- oder Lumpenfasern zur Bildung eines zähen Gemisches, was das Interesse der Menschen weckte und zur gezielten Produktion derartiger Erzeugnisse inspirierte.<sup>6</sup>



**Abbildung 1.1:** Cai Lun, Verfasser der ersten belegten Beschreibung der Papierfertigung

<sup>3</sup>Abbildung aus: Tsuen-Hsui, T.: Paper and Printing, in: Science and Civilisation in China, S. 108. [Nee93]

<sup>4</sup>Gabel, A. et al.: Das Papier wandert von Asien nach Europa, S. 2. [Gab90]

<sup>5</sup>Tsuen-Hsui, T.: Paper and Printing, in: Science and Civilisation in China, S. 108. [Nee93]

<sup>6</sup>ebenda, S. 3. [Nee93]

Gabel, Schlieder und Stümpel beschreiben in ihrem Essay *Das Papier wandert von Asien nach Europa* sehr anschaulich die Verbreitung des Papiers und bemerken:

“Im 6. und 7. Jahrhundert gelangte die Kenntnis der Papierherstellung nach Korea und Japan. Hier wie auch in einigen anderen Ländern Asiens hat sich die frühe Form der Handpapierherstellung bis in die heutige Zeit erhalten. Im Westen übernahmen die Araber die Technik, deren Herrschaft bis an die Westgrenzen Chinas reichte. [...] Die Papierherstellungstechnik breitete sich [...] im ganzen islamischen Kulturbereich aus und gelangte ab dem 10. Jh. über Nordafrika bis in das maurische Spanien. [...] Durch Kontakte mit arabischen Kaufleuten gelangte das Papier im 13. Jh. nach Italien, das für die Entwicklung der europäischen Papierherstellung eine entscheidende Rolle spielte.”



**Abbildung 1.2:** Der Holzschnitt von Jost Amman ist die älteste bildliche Überlieferung des Papiermachens in Europa.

Die ersten Papierimporte nach Europa fanden bereits vor dem Jahr 1200 statt. Die Erkenntnis der Vorteile dieses Materials führte zur Eröffnung der ersten Papiermanufaktur 1250 im italienischen Fabriano. Dies markiert den Beginn der europäischen Papiermacherei.<sup>7</sup> Mit ihr ging eine langsame aber stetige Technisierung des Produktionsablaufes einher, was zur Erfindung vieler Apparate zur Vereinfachung der Herstellung und zur Verbesserung der Oberfläche führte.

Im Jahr 1390 wurde vor den Toren Nürnbergs die erste Papiermühle auf deutschem Boden in Betrieb genommen.<sup>8</sup> Durch die steigende Nachfrage entstanden immer mehr Papiermühlen, welche den Prozess der Papierherstellung bis ins 18. Jahrhundert unverändert durchführten. Im Zuge der industriellen Revolution wurde diese Methode des Handschöpfens durch maschinelle Produktionsprozesse abgelöst, was zu einem rasanten Anstieg der Produktionszahlen führte. Die erste Papiermaschine wurde vom Franzosen Louis Robert entwickelt und 1799 patentiert. Hierbei ersetzt ein umlaufendes endloses Sieb die Handschöpfung. Diese Langsiebmaschinen setzten sich schnell durch und fanden mit Beginn des 19. Jahrhunderts vor allem in Frankreich und England eine rasante Verbreitung. Weitere Erfindungen wie beispielsweise die Rundsiebmaschine ermöglichten die Entwicklung immer neuer und leistungsfähigerer Papierprodukte. Parallel dazu entstanden neue Wege der Papierveredelung wie die Bleichung mit Chlor oder der Einsatz neuartiger Methoden der Verleimung. Die vormals kleinen Papiermühlen wurden nun durch große Papierfabriken abgelöst, die neben der Papierproduktion auch zur Herstellung der Rohstoffe dienten. Mit der Erfindung des Holzschliffs durch Friedrich Gottlob Keller im Jahr 1843 wurde Holz als Rohstoff erschlossen.<sup>9</sup> Nach Entwicklung chemischer Verfahren zur Erzeugung reinen Zellstoffes wurden Lumpen als Rohstoff endgültig abgelöst, die industrielle, holzbasierte Papierproduktion entwickelte sich rasant und avancierte zu einem wichtigen Wirtschaftsfaktor in allen Teilen der Welt.

### 1.2 Produktvielfalt

Die industrielle Fertigung von Papieren auf Zellstoffbasis brachte weitreichende Vorteile mit sich. Neben der reinen Steigerung der Ausstoßmenge konnte eine nicht gekannte Exaktheit und gleichbleibende Qualität sichergestellt werden. Dies führte zur Entwicklung neuartiger Produkte auf Papierbasis, die nicht ausschließlich als Schreib- oder Druckpapiere zum Einsatz kommen. Hier sind zunächst die *Hygienepapiere* zu nennen, welche als Ersatz für textile Stoffe entwickelt und vertrieben wurden. Sie werden auch als *Tissue-Papiere* bezeichnet, verfügen über eine weiche Oberfläche und sind sehr saugstark. Die große Bandbreite reicht von Toilettenpapieren, Servietten, Windeln und weiteren Zellstoffwaren bis hin zu Kosmetik-, Küchen- und Papiertaschentüchern. Vormals als Mehrweezerzeugnisse verwendete Artikel wie Taschentücher wurden nun durch wesentlich hygienischere Einwegprodukte abgelöst. Diese Produkte wurden immer weiter verbessert und durch neuartige Verfahren als mehrlagige und weiche Luxusartikel angeboten.

---

<sup>7</sup>Oligmüller, G. et al.: Papier - Vom Handwerk zur Massenproduktion, S. 10.[Oli01]

<sup>8</sup>ebenda, S. 11.[Oli01]

<sup>9</sup>Gabel, A. et al.: Das Papier wandert von Asien nach Europa, S. 15. [Gab90]



Nach dem Zweiten Weltkrieg etablierten sich Hygienepapiere auch in den Haushalten mit geringeren Einkommen und verdrängten nach und nach sämtliche Mehrwegprodukte.<sup>10</sup> Neben Hygienepapieren wurden eine Vielzahl von Anwendungen entwickelt, bei denen *Spezialpapiere* zum Einsatz kommen. “Unter diesem Begriff wird heute die Vielzahl technischer Papiere zusammengefasst, die weder der großen Gruppe der “grafischen Papiere” [...], noch den Hygiene- oder Verpackungspapieren und -pappen zugerechnet werden können.”<sup>11</sup> Hierzu werden unter anderen gezählt: *Buntpapiere* (einseitig eingefärbte bzw. ganzflächig durchgefärbte Papiere), *Dachpappen* (mit Pech oder Teer beschichtete, saugfähige Papp), *Dekorpapiere* (teilweise imprägnierte Papiere zur Oberflächenveredelung von Holzwerkstücken), *Fotopapiere* (lichtempfindliches Papier zur chemischen Entwicklung von Fotos), *Löschpapiere* (künstliche Trocknung des Beschreibstoffes durch Tintenaufnahme), *Schleifpapiere* (Oberflächenbehandlung von Werkstücken), *Tapeten* (einseitiges, mit Mustern bedrucktes, schmückendes Papier für Wände), *Thermopapiere* (berührungslos thermisch bedruckbare Papiere) und *Zigarettenpapiere* (Hüllpapiere für Tabak).

Durch die günstige Produktion und leichte Rezyklierbarkeit haben sich Papierprodukte als leistungsstarke und einfach zu handhabende Schutzhüllen von Produkten etabliert. Zunächst wurde angenommen, dass Papiere erst recht spät zu Verpackungszwecken herangezogen wurden, da sie zunächst nur wohlhabenden Bevölkerungsteilen zugänglich waren. Nachweislich wurden aber schon im 17. Jahrhundert kleine Papiertüten verwendet um Produkte wie Nähnadeln zu verpacken.<sup>12</sup> Von Beginn an wurden unzählige Sorten an Verpackungspapieren entwickelt, die Nahrungsmittel und Produktionsgüter schützten und transportfähig machten. Durch die Bedruckbarkeit wurde neben dieser Schutzfunktion die Werbewirksamkeit der Verpackung immer wichtiger und scheint in der heutigen Zeit diese sogar zu überflügeln.

Die weitaus größte Gruppe technischer Papiere wird von den *Verpackungspapieren und -pappen* eingenommen. Im Jahr 2013 wurden in Deutschland 22,4 Mio. Tonnen Papier-, Papp- und Kartonerzeugnisse produziert. Im internationalen Vergleich lag Deutschland im Jahr 2014 nach China (102,500 Mio. Tonnen), den USA (74,376 Mio. Tonnen) und Japan (26,082 Mio. Tonnen) auf dem vierten Platz der größten Papierproduzenten und scheint diese Position auch im Jahr 2015 halten zu können.<sup>13</sup>

Um die schier unüberschaubare Produktvielfalt der Papierprodukte zu kategorisieren hat der *Verband Deutscher Papierfabriken (VDP)* die Gesamtproduktion in vier Hauptgruppen aufgegliedert. Der VDP liefert in seinem Jahresbericht für 2013 folgende Kennwerte für die auf der nächsten Seite erläuterten Gruppen.

---

<sup>10</sup>ebenda, S. 20ff. [Gab90]

<sup>11</sup>ebenda, S. 22. [Gab90]

<sup>12</sup>ebenda, S. 24. [Gab90]

<sup>13</sup>VDP: Papier Kompass 2014. (Kennwerte aus dem Jahr 2012) [VDP15]

### 1. Graphische Papiere

Mit einem Anteil von 38,8% (8,67 Mio. Tonnen) entfällt ein großer Anteil der jährlichen Papierproduktion in Deutschland auf Druck- und Pressepapiere sowie Büro- und Administrationspapiere. Sie werden als *Graphische Papiere* zusammengefasst.<sup>14</sup> Diese nach Untergruppen vielfältigste Hauptgruppe vereint sämtliche Papiere, die für Druckprozesse im graphischen Bereich eingesetzt werden. Unterschieden werden holzhaltige Papiere (Zeitungsdruckpapiere, beidseitig gestrichene Rollenoffsetpapiere, andere Presse- und Katalogpapiere, andere holzhaltige Papiere, Recyclingpapiere) und holzfreie Papiere (gestrichene und ungestrichene Druck- und Schreibpapiere).

### 2. Papier, Karton und Pappe für Verpackungszwecke

Infolge des digitalen Wandels geht die jährliche Produktion der graphischen Papiere stetig zurück. Demgegenüber steht ein Wachstum bei den Papieren für Verpackungszwecke, zu denen auch die in dieser Arbeit untersuchten Wabenplatten aus Wellpappe zählen. Mit einem Anteil von 48,8% (10,903 Mio. Tonnen) an der jährlichen Papierproduktion ist diese Gruppe die Größte der vier Hauptgruppen. Sie gliedert sich in die Untergruppen Pack- und Wellpappenpapiere, Maschinenkarton, Wickelpappe und Verpackungspapiere.

### 3. Hygiene-Papiere

Mit 6,3% (1,414 Mio. Tonnen) haben die Hygienepapiere einen sehr geringen Anteil an der jährlichen Gesamtproduktion in Deutschland und konnten in den letzten Jahren eine minimale Steigerungsrate verzeichnen.

### 4. Papierprodukte für technische und spezielle Verwendungszwecke

Die letzte Hauptgruppe ist mit einem Anteil von 6,1% (1,378 Mio. Tonnen) die kleinste und umfasst Papiere für Anwendungen wie Tapeten, Fotopapier, Dekorfolien und Spezialpapiere für technische Anwendungen.

Werden die Absätze der Papierproduzenten weltweit betrachtet, so ist nach jahrelangen Steigerungsraten eine Stagnation seit 2011 zu verzeichnen. Dies ist auf das Schrumpfen des Marktes der gedruckten Presseartikel infolge des Siegeszuges digitaler Medien zurückzuführen und betrifft vor allem die graphischen Papiere. Im Bereich der Verpackungspapiere ist eine leichte Steigerung abzulesen, welche den globalen Abwärtstrend aber nur geringfügig ausgleicht. Unter dem Einfluss des digitalen Wandels und der stetigen Reduzierung des Rohstoffverbrauches schrumpfen zwar die klassischen Absatzmärkte, doch rücken neue Geschäftsfelder wie die Bauindustrie in den Fokus und führen zur intensiven Erforschung von papiernen Produkten.

---

<sup>14</sup>Göttsching, L. (Hrsg.): Papier in unserer Welt - Ein Handbuch, S. 23. [Göt90]

## 1.3 Kulturelle und technische Bedeutung

Papier ist zweifellos eine der wichtigsten Entwicklungen der Menschheit. In allen Lebensbereich finden sich Produkte aus oder in Kombination mit Papier und Papierprodukten. Unzählige alltägliche wie industrielle Abläufe haben einen direkten Bezug zu diesem universellen Erzeugnis. Elementare Grundlage für diese tiefe gesellschaftliche Durchdringung stellt die Kombinationsaffinität mit anderen Werkstoffen dar und ermöglichte die Entwicklung einer Vielzahl von bahnbrechenden Erfindungen. Die nach wie vor wichtigste und Bedeutung hat Papier als *Informationsträger* und *Speichermedium*. Schon die begriffliche Abstammung vom griechische *papyrus*<sup>15</sup> bzw. *papyros*<sup>15</sup> weist auf die Verwendung als Beschreibstoff hin und dient diesem Zweck bis in die heutige Zeit auf sehr effiziente Weise. Zunächst war der Gebrauch von Papier nur einem kleinen Teil der Gesellschaft zugänglich. Erst mit der aufkommenden Alphabetisierung wurde es von größeren Gesellschaftsteilen genutzt und war nun der wichtigste Gegenstand zur Fixierung des geschriebenen Wortes. Die Erfindung des modernen Buchdrucks durch Johannes Gutenberg führte zu einem rasanten Anstieg der Papierproduktion im 15. Jahrhundert.

Oligmüller und Schachtner führen das "Funktionieren der modernen Gesellschaft" vor allem auf die Entwicklung des Papiers zurück, denn es wird "... zum unentbehrlichen Werkzeug für juristische, technische, wirtschaftliche, politische, religiöse, künstlerische und private Kommunikation [...] Die Fähigkeit, Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft gedanklich zu verknüpfen zu können, ist ein zentrales Merkmal menschlicher Kultur."<sup>16</sup> Die Verbreitung von Informationen mit dem Medium Papier wird dabei zum zentralen Werkzeug gesellschaftlicher Umwälzungen. Das geschriebene Wort dient der Identitätsbildung und der intellektuellen Reifung des Volkes. Es wird dadurch nicht nur zum langfristigen Speicherort sondern auch zum Werkzeug des Lernens. Lesen, schreiben und rechnen werden mithilfe von Papier erlernt, was es zu dem wichtigsten gesellschaftsbildenden Impulsgeber macht.

Weber bezeichnet Papier als *Kulturkatalysator der Renaissance* und führt die Flugblätter der Reformation als wesentlichen Grund für die deren Entwicklung an. Das Zusammenleben der Menschen wird durch niedergeschriebene Gesetzestexte geregelt, die für alle Beteiligten bindend sind. Religiöse Schriften verkünden die Worte von Propheten und werden damit zu Trägern von gesellschaftlichen Leitbildern. Überlieferungen aus dem osmanischen Reich des 16. Jahrhunderts zeugen von der Ehrfurcht gegenüber dem Papier, auf dem das Wort Gottes steht. Es durfte daher niemals auf dem Boden liegen und betreten werden.<sup>17</sup> Papier dient somit nicht nur als Informations-, sondern auch als Symbolträger. Dies beweisen unter anderem die Geisterpapiere im Fernen Osten, die Gebetstrommel in Tibet oder die Glückspapiere in Japan.<sup>18</sup>

<sup>15</sup>Pflanzenart der Zyperngräser (*Cyperus papyrus*), deren getrocknete Blätter schon im 3. Jahrtausend v. Chr. im alten Ägypten verwendet wurden, um Texte und Zeichnungen darauf festhalten zu können.

<sup>16</sup>Oligmüller, G. et al.: Papier - Vom Handwerk zur Massenproduktion, S. 15. [Oli01]

<sup>17</sup>vgl. Weber, T.: Die Sprache des Papiers, S. 10. [Web04]

<sup>18</sup>ebenda, S. 89ff. [Web04]

## 1 Papier und Papierprodukte

Ab dem 9. Jahrhundert kam Pappel im China der Tang-Dynastie als Rohstoff zur Herstellung von Geld zum Einsatz. Dieses kunstvoll bemalte Material wurde nun mit einem Wert versehen, welcher sich gegen Waren oder Dienstleistungen eintauschen ließ.<sup>19</sup> Papier hat sich als Verkünder und Bewahrer von Informationen in allen Teilen der Welt etabliert. Nicht zuletzt sind hier die Abermillionen Bücher anzuführen, die Jahr für Jahr gelesen werden. Zwar hat der digitale Fortschritt auch in diesem Bereich Einzug gehalten führt zum Rückgang klassisch gedruckter Bücher. Trotzdem sind nicht wenige Menschen überzeugt, dass ein Buch neben der intellektuellen auch eine haptische Erfahrung darstellt. Die Bedeutung von Papier geht jedoch weit über die Nutzung als Wissensträger hinaus. Es existiert fast kein Bereich im produzierenden Gewerbe, der ohne Papierprodukte arbeitsfähig wäre. Vor allem im japanischen Kulturkreis finden sie in vielen Lebensbereichen Anwendung. Dort werden Kleidungsstücke aus imprägnierten, zerknüllten Papier hergestellt, die als *Kamiko* bezeichnet werden. (siehe Abb. 1.3)<sup>20</sup>



**Abbildung 1.3:** Kamiko - Japanisches Papiergewand

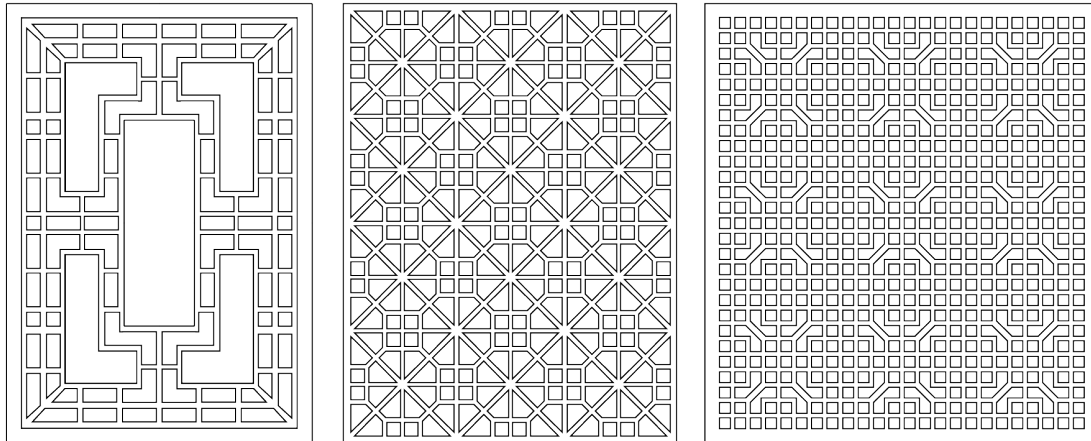
In der Kunst haben sich unzählige Stile mit Bezug zum Papier entwickelt. Vor allem die *Kalligraphie* setzt sich intensiv mit den Eigenschaften des Papierbogens auseinander und nutzt diese zur ästhetischen Verbindung von Schrift und Malerei. Zeichnungen auf Papier, geprägte Kunstobjekte aus Papierfragmenten und auch Collagen reagieren auf ganz unterschiedliche Weise mit dem Material. Als Träger einer visuellen Information hat Papier in Form der analogen Fotografie völlig neue Möglichkeiten der Wissensverbreitung eröffnet.

---

<sup>19</sup>ebenda, S. 155. [Web04]

<sup>20</sup>Abbildung aus: Tsuen-Hsuein, T.: Paper and Printing, in: Science and Civilisation in China, S. 113. [Nee93]

Papier dient auch zur Herstellung von Kunstobjekten sowie Skulpturen und ist nicht zuletzt als Papierwand in der Architektur zu finden. In Japan kamen so genannte *Shoji* zum Einsatz. Diese raumtrennende Elemente dienten als Fenster. *Fusuma* sind kunstvoll bemalte Schiebetüren zwischen Räumen oder vor Regalen. In China wird Papier sehr kunstvoll als architektonisches Element eingesetzt. Hierbei werden aufwändig hergestellte Holzrahmen mit transluzentem Papier versehen, die bemerkenswerte Lichtspiele zwischen Innen- und Außenraum erzeugen. (siehe Abb. 1.4)<sup>21</sup>



**Abbildung 1.4:** Muster zur Papierbespannung westchinesischer Fensterrahmen

Die immense Bedeutung des Papiers für die Gesellschaft und seiner Entwicklung ist unbestritten. Unzählige Einsatzgebiete zeugen von der extremen Vielfalt und Wandelbarkeit dieses Materials. Davon zeugen die dünnen Zigarettenpapiere ebenso wie die Wabenplatten in architektonischen Anwendungen. Das simple Herstellungsprinzip hat sich seit seiner Entwicklung nicht wesentlich verändert und führt mit der mittlerweile sehr hohen Recyclingquote zu einem Produkt, dass in seiner Anwendungsvielfalt Maßstäbe setzt. All diese Eigenschaften machen Papier zu einem Material der Zukunft.

<sup>21</sup>Abbildung nachgezeichnet aus: ebenda, S. 121. [Nee93]

## 1.4 Eigenschaften

Aufgrund der großen Vielfalt von Papierprodukten sind die wichtigsten Eigenschaften immer im direkten Kontext mit der an das Material gestellten Aufgabe zu überprüfen. Grundlegend können industriell produzierte oder handgeschöpfte Papiere unterschieden werden. Die hochtechnisierten Produktionsabläufe der industriellen Produktion ermöglichen eine exakte Herstellung und qualifizierte Überprüfung der Papierwaren. Zunächst werden die messtechnisch eindeutig verifizierbaren Kennwerte analysiert.<sup>22</sup> Anschließend erfolgt die Bewertung der optischen und haptischen Eigenschaften. Hierbei kommen auch subjektive Bewertungskriterien des Betrachters zum Tragen. Eine besondere Form der subjektiven Eigenschaften stellt die *Klanghärte* des Papiers dar. Sie beschreibt die akustische Wirkung, welche je nach Papiersorte und durchgeführter Aktion (z.B. Knittern, Knüllen, Falten oder Zerreißen) entsteht. Eine sehr detaillierte Auflistung sämtlicher objektiven Materialkennwerte und subjektiven Eigenschaften von Papier führt das *Papierlexikon* des Zentral-Fachausschusses Berufsbildung Druck und Medien.<sup>23</sup>

### 1.4.1 Physikalische, mechanische und chemische Attribute

Papier und Papierwerkstoffe können mit ausgereiften und sehr detaillierten Methoden vermessen, überprüft und bewertet werden. Hierbei werden Kennwerte verschiedener Disziplinen ermittelt und in einen Zusammenhang gebracht.

#### Zusammensetzung

Das grundlegendste Unterscheidungsmerkmal der Papiere ist in der Art und Kombination ihrer Ursprungsfasern zu finden. Diese weisen höchst differenzierte Charakteristika auf und bestimmen die Kennzeichen des späteren Papierproduktes. So sind die Stabilität, das Volumen und die Oberflächenbeschaffenheit schon bei der Auswahl des Rohstoffes steuerbar. Während die industrielle Produktion hauptsächlich auf Zellulose auf Holzbasis oder Recyclingfasern als Spender zurückgreift, kommen im Bereich der handgeschöpften Papiere eine wesentlich größere Vielfalt an Fasern zum Einsatz. Diese können neben einem pflanzlichen (Baumwolle, Koks, Hanf) auch einen tierischen (Seide, Wolle, Leder) oder künstlichen (Kunstseide, Glasfasern, Fasern auf Basis von Polyamid, Polyvinyl, Polyacryl, Polyester oder Polyolefine) Ursprung haben.<sup>24</sup>

#### Grammatur

Die Massenbelegung oder flächenbezogene Masse von Papier wird *Grammatur* (*G*) genannt. Sie gibt das Verhältnis der Papiermasse zu einer Flächengröße in der Einheit  $\text{g/m}^2$  an und ist der wichtigste Materialkennwert im Umgang mit Papierprodukten. Durch den unterschiedlichen Feuchtegehalt der Papiere erfolgt eine Messung der Grammatur unter Laborbedingungen bei einer Temperatur von  $23^\circ\text{C}$  und einer Luftfeuchtigkeit von 50%.

---

<sup>22</sup>UPM (Hrsg.): So entsteht Qualitätspapier, S.26ff. [UPM14]

<sup>23</sup>Webseite: [www.zfamedien.de/ausbildung/buchbinder/tutorials/dictionary-paper.php](http://www.zfamedien.de/ausbildung/buchbinder/tutorials/dictionary-paper.php), Abruf am 26.01.2015. [ZFA15]

<sup>24</sup>vgl. Asunción, J.: Das Papierhandwerk, S. 102. [Asu03]

### Dicke

Neben der Grammaturn mit seinem Bezug zur Masse können Papiere auch durch ihre Dicke unterteilt werden, was als *Kaliber* bezeichnet wird.<sup>25</sup> Dies gilt für Papiere ebenso wie für Karton und Pappe. Die Angabe erfolgt in  $\mu\text{m}$ , einer Längeneinheit mit dem Wert  $10^{-2}$ . Die Produktion der exakten Dicke eines Papierbogens wird mithilfe eines Kalibrierkalenders erreicht.<sup>26</sup>

### Festigkeitswerte

Die *Zugfestigkeit* ist die wichtigste einer Reihe zu bestimmender Festigkeiten von Papieren. Sie wird auch als *Bruchwiderstand* bezeichnet und gibt in  $\text{kN/m}$  an, welche maximale mechanische Zugspannung auf eine bestimmte Länge des Papiers wirkt, bevor es zerreißt. In Faserrichtung besitzt Papier höhere Zugfestigkeiten als in Querrichtung (engl. *cross section*: CD), wo höhere Dehnbarkeiten vorliegen. Die Umgebungsfeuchte hat darauf einen entscheidenden Einfluss, da das Papier bei höherer Feuchte elastischer wird. Dieser Vorgang wird auch als *Reißlänge* bezeichnet. Hierbei wird untersucht, wie lang ein Streifen Papier mit gleichbleibender Breite und Dicke sein kann, bevor er bei einseitiger Aufhängung durch sein Eigengewicht abreißt. Zusätzlich wird die *Bruchdehnung*  $A$  ermittelt. Sie gibt den Unterschied  $\Delta L$  der Ausgangslänge des Papierstreifens zur Länge bei seinem Versagen unter Last in Prozent an. Einen essentiellen Kennwert für Papierprodukte stellt das Standardverfahren des *Mullen-Tests* zur Ermittlung der *Berstfähigkeit* (Berstdruck) dar. Er gibt an, welchen Widerstand eine Papierprobe einem gleichmäßig ansteigenden Druck standhält. Der so genannte Berstfestigkeitswert wird in  $\text{kPa}$  angegeben.<sup>27</sup> Die *Biegesteifigkeit* gibt an, welchen Widerstand ein Papier einer einwirkenden Kraft entgegensetzt und in eine elastische Biegereaktion umwandelt. Ihr Wert hängt von den eingesetzten Rohstoffen und der Dicke des Papiers ab. Sollen die Festigkeitswerte von Papier noch tiefergehend untersucht werden, können außerdem folgende Kennwerte ermittelt werden: Einreißwiderstand, Durchreißwiderstand, Falzwiderstand, Nassbruchwiderstand, Laugenwiderstand.

Zusätzlich zu den genannten Werten sind die Elastizität, die Trocken- und Nassrupffestigkeiten, die Gefügefestigkeiten und die Radierfestigkeiten zu analysieren.<sup>28</sup> Wird ein Papier sachgerecht und in unbeschädigtem Zustand aufbewahrt, so steigern sich seine Festigkeitswerte im Laufe der Zeit wie bei abgelagerten Holz.

### Spezifisches Gewicht

Das spezifische Gewicht eines Papierproduktes beschreibt, wie kompakt das Papier beschaffen ist. Je höher die Dichte, je glatter ist das Rohpapier. Es wird in  $\rho$  (Rho) angegeben, beschreibt den Quotienten aus der Masse ( $m$ ) eines Körpers und seinem Volumen ( $V$ ) und wird mit der Formel  $\rho = \frac{m}{V}$  dargestellt.

<sup>25</sup>vgl. ZFA Papierlexikon. [ZFA15]

<sup>26</sup>Walzenanlage mit zwei bis neun Walzen. Der Walzenabstand nimmt immer weiter ab und erzeugt eine gleichmäßige Papierdicke.

<sup>27</sup>VDW: Basiswissen Wellpappe, 2014. [VDW14a]

<sup>28</sup>vgl. ZFA Papierlexikon, 2015 [ZFA15]

### Spezifisches Volumen

Zur genaueren Beschreibung eines Papiers wird weniger das spezifische Gewicht sondern besser sein Kehrwert verwendet. Das *spezifische Volumen* (Bulk) und die Formel  $v = \frac{1}{\rho}$  beschreiben den Zusammenhang. Durch einen hohen Mineraliengehalt oder eine starke Satinierung erhält das Papier eine hohe Dichte und ein niedriges spezifisches Volumen. Das Volumen moderner Papierprodukte lässt sich mittlerweile sehr genau steuern und führt zu Produkten, welche bei einer Grammaturn von  $90\text{g/m}^2$  über eine höhere Dicke verfügen als ein Papier mit  $115\text{g/m}^2$ .

### Faserlaufrichtung

Papier wird in einem dauerhaft ablaufenden Prozess in einer Papiermaschine produziert. Dies führt dazu, dass sich die Fasern in Laufrichtung der Maschine (engl. *machine direction*: MD) ausrichten. In Laufrichtung hat das Papier wesentlich bessere Festigkeitswerte als gegen diese, was bei der Produktion von Papierprodukten wie beispielsweise Büchern zu beachten ist. Dabei hat der Buchrücken parallel zur Faserrichtung zu verlaufen, um ein leichtes Blättern zu ermöglichen.

### Hygroskopizität

Durch seinen Herstellungsprozess ist Papier ein sehr hygroskopisches Produkt. Wird diese Eigenschaft nicht gewünscht, erfolgt eine Nachbehandlung zur Erhöhung des Wasserwiderstandes. (siehe auch Kapitel 1.5.3) Manche Einsatzgebiete erfordern dieses Saugvermögen jedoch geradezu und profitieren davon. Dies wird deutlich, wenn die Aufnahme von Farbe oder anderen Flüssigkeiten wie Bindemitteln betrachtet werden. Zu beachten ist hierbei das sich verändernde Quell- und Schwindverhalten unter Feuchteeinwirkung.

### Durchlässigkeiten

Die Durchlässigkeit bzw. die Undurchlässigkeit von Papieren gegenüber verschiedensten Medien ist im Herstellungsprozess regulierbar. Primär ist hier die Wasserdurchlässigkeit (Teebeutel) zu nennen. Weiterhin gehören die Fettdurchlässigkeit (Lebensmittelverpackung), die Luftdurchlässigkeit (Filter), die Laugendurchlässigkeit (Etikettenpapier auf Mehrwegflaschen) oder auch die Lichtdurchlässigkeit (Transparentpapier) dazu.

### Feuchteresistenz

Die Struktur von Papier erfährt durch einwirkende Flüssigkeiten eine starke und teilweise nicht umkehrbare Veränderung. Hierbei werden die Bindungskräfte zwischen den Papierfasern geschwächt oder gänzlich aufgehoben. Zu unterscheiden ist hierbei zwischen *Adsorption* und *Absorption*, was in Kapitel 3.1 näher beleuchtet wird und mit der Hygroskopizität zusammenhängt. Naturgemäß verfügt Papier über eine extrem geringe Feuchteresistenz. Diese ist nur mithilfe von Oberflächenbehandlungen zu verbessern, welche in Kapitel 1.5.3 näher erläutert werden.



### Feuerresistenz

Papier fängt extrem leicht Feuer und besitzt eine sehr gute Brennbarkeit, was unter anderem auf die große Oberfläche einer Lage Papier zurückzuführen ist. Die Brennbarkeit nimmt ab, je stärker das Papier beim Produktionsprozess gepresst wurde. Diese in den meisten Fällen ungewünschte Eigenschaft ist auf die Zellstoff-Fasern zurückzuführen, welche aus Holz oder anderen pflanzlichen Quellen gewonnen werden. Dadurch ist Papier den Holzwerkstoffen und der Brandklasse A zuzuordnen.<sup>29</sup> Zuschlag- und Füllstoffe können die Brennbarkeit verringern und somit ein flammhemmendes oder schwer entflammbares Papier erzeugen.<sup>30</sup>

### 1.4.2 Optische Eigenschaften

Papier ist ein universeller Stoff, dessen Charakteristika sehr detailgenau auf die entsprechende Nutzung einzustellen ist. Der visuellen Erscheinung des Papierproduktes kommt hierbei eine besondere Bedeutung zu. Diese Merkmale sind objektiv durch maschinelle Testmethoden und subjektiv durch eine betrachtende Bewertung des Nutzers zu klassifizieren.

### Farbe

War in den Anfangszeiten der Papierproduktion die vorhandene Farbpalette noch sehr beschränkt, sind heute alle denkbaren Farbpapiere realisierbar. Jedes Papier besitzt eine eigene Farbe, die aus den eingesetzten Rohstoffen und Bearbeitungsmethoden resultiert. Sie reicht je nach Dunkelheit von Elfenbein über Gelb bis zu Ocker und Grau. Eine nachfolgende Bleichung bzw. Einfärbung mit Pigmenten erzeugt die gewünschte Farbe des Endproduktes. Die Farbwirkung des Papiers hängt stark von den Umgebungsbedingungen ab. So wirken sich Lichtabsorption und -streuung ebenso auf die Erscheinung aus wie die Art des Lichts selbst, denn Papiere wirken bei Licht ohne UV-Anteil wesentlich heller als ohne diesen.

### Helligkeit

Im Bereich der Druckpapiere kommt der Helligkeit der Oberfläche eine besondere Bedeutung zu. Sie gibt an, wie viel des auftretenden Lichts reflektiert wird. Die Helligkeit wird im Produktionsprozess durch den Einsatz von durch eingesetzte Bleichmitteln erreicht und ist für die Lesbarkeit eines bedruckten Papiers verantwortlich. Holzhaltige Papiersorten können dabei recht stark von holzfreien abweichen.

### Weißgrad

Die visuelle Wahrnehmung einer Papieroberfläche hängt stark von der Farbvalenz (wahrgenommene farbige Wirkung einer Strahlung) ab. Einige Oberflächen wirken auf den Betrachter weißer als andere. Da sich dies nicht ausschließlich mit dem Wert der Helligkeit erklären lässt, wird der Weißgrad zum Maßstab genommen. Er resultiert aus dem Herstellungsprozess und den eingesetzten Farbpigmenten.

---

<sup>29</sup>Brandklasse A: "Brände fester Stoffe, hauptsächlich organischer Natur, die normalerweise unter Glutbildung verbrennen." aus: DIN EN 2: Brandklassen, Februar 2005 [DIN05]

<sup>30</sup>Rodewald, G.: Brandlehre, S. 151. [Rod07]

### Opazität

Papier ist je nach Struktur in der Lage, das einfallende Licht unterschiedlich stark zu reflektieren. Dies hat einen Einfluss auf seine *Lichtdurchlässigkeit*. Wird die Lichtstrahlung ganz reflektiert, erscheint das Papier opak und damit undurchsichtig. Im Gegensatz dazu erscheint es *transparent*, je geringer seine Opazität ist. Eine hohe Opazität ist beispielsweise bei Papieren gewünscht, die beidseitig bedruckt werden sollen. Eine geringe Opazität erweist sich bei Transparentpapieren als vorteilhaft.

### Glanz

Reflektiert eine opake Paperoberfläche das eintreffende Licht in einem bestimmten Winkel, so wird diese als glänzend wahrgenommen. Diese Eigenschaft wird beim Druck von Bildern genutzt, um einen gestochen Scharfes Ergebnis zu erzielen. Im Gegensatz dazu eignet sich eine weniger glänzende Oberfläche besonders für den Druck von Text.

### Durchsicht

Hochwertige Papiere verfügen über eine gleichmäßige Verteilung (Formation) der Fasern. Dies wird mittels *Durchsicht* überprüft. Je weniger Ungleichmäßigkeiten (Wolken) zu erkennen sind, je gleichmäßiger erscheint das Papier und je besser lässt es sich für Druckaufgaben einsetzen.

### 1.4.3 Haptische Eigenschaften

Neben den optischen Merkmalen ist Papier auch ein Stoff, der durch berührende Wahrnehmung mit den Händen erfahren wird. Die Bewertung erfolgt immer im Zusammenhang mit einigen oben genannten physikalischen Eigenschaften wie beispielsweise der Dicke oder dem Gewicht. Diese Faktoren beeinflussen die haptische Erfahrung maßgeblich, da die Oberflächenbeschaffenheit eines leichten Papiers gänzlich anders wahrgenommen wird als jene eines schweren Tastobjektes..

### Rauheit

Die Unebenheiten einer Paperoberfläche definieren ihre Rauheit. Sind sie von der menschlichen Hand ertastbar, wird das Papier im allgemeinen als rau wahrgenommen. Dies ist vor allem bei ungestrichenen Papieren der Fall, da diese weder geglättet oder gestrichen werden. Die Rauheit einer Oberfläche wird im allgemeinen in drei Klassen (mittlere Rauheit, quadratische Rauheit, gemittelte Rautiefe) unterteilt und in  $\mu\text{m}$  angegeben. Die EN ISO 25178 definiert die *flächenhafte Rauheitsmessung* und legt Kenngrößen, Messvorgänge und -geräte fest.

### Glätte

Ein Papier wird als glatt empfunden, wenn seine Oberfläche durch Einsatz eines Glättwerks oder durch nachgelagerte Methoden des Papierveredelns über sehr wenige und nur kleine Unebenheiten verfügt. Obwohl sich die Glätte eines Papiers vor allem auf die Wiedergabe des Druckbildes auswirkt, ist seine Erscheinung sehr gut durch das Abtasten begreifbar. Die Glätte ist ein eindeutiges Qualitätsmerkmal und sorgt für eine hochwertigere Erscheinung. Sie wird vor allem durch die Verwendung spezieller Walzen in der Papiermaschine und die Nachbehandlung auf der Streichmaschine erreicht.

### **Griffigkeit**

Eine sehr subjektiv wahrgenommene Eigenschaft von Papier stellt die Griffigkeit dar. Sie ist das Ergebnis des Zusammenspiels von *Glätte*, *Dicke*, *Biegesteifigkeit* und *Elastizität*. Eine eindeutige Zuordnung welche dieser Faktoren in welchem Verhältnis zusammenkommen müssen, um ein besonders *griffiges* Papier zu erzeugen, ist deshalb nicht möglich. Die Bewertung eines Papiers in diesem Kontext hängt deshalb stark vom subjektiven Urteil der Testperson ab. Trotzdem haben sich für bestimmte Produkte gewisse Grammatur-Spannen etabliert, die von den Nutzern als angenehm bezeichnet werden.

### **Kantenbeschaffenheit**

Die Kante eines Papiers wird als scharfkantig empfunden, wenn der Bogen einerseits über eine sehr hohe Dichte und Steifigkeit bei einer sehr niedrigen Dicke verfügt. Papiere mit den gegenteiligen Merkmalen einer geringen Dichte und Steifigkeit bei hoher Papierdicke wirken abgerundet.

### **Zusammenfassung**

Die beschriebenen Eigenschaften zeigen, dass Papier auf die unterschiedlichsten Arten zu bewerten ist. Dafür können objektive und subjektive Parameter herangezogen werden. Im Gegensatz zu vielen technischen Produkten sind die optischen und haptischen Bewertungskomponenten sehr stark ausgeprägt. Diese wirken vor allem im gemeinsamen Zusammenspiel. Deshalb ist eine unüberschaubare Menge an unterschiedlichen Papiersorten verfügbar, was eine immer differenziertere Kategorisierung nach sich zieht. Dabei erweitert sich auch der Funktionsumfang und die Leistungsdaten der Produkte, was diese gegenüber ihren technischen Vorfahren überlegen macht.

## 1.5 Produktion

Die Kenntnis des Papiermachens reicht bis ins 2. Jahrhundert v. Chr. zurück und die grundlegende Produktionsweise hat sich bis in die heutige Zeit nicht nennenswert geändert. Sie beruht auf den drei Bereichen:

Rohstoffzerkleinerung – Faserbrei durch Wasserzugabe – Formgebung

Einzig die zugeführten Rohstoffe haben sich den technischen Entwicklungen angepasst und händische Prozesse wurden von effizienten maschinellen Abläufen verdrängt. Da als Grundlage zur Papierherstellung immer ein Faserstoff vorhanden sein muss, kann davon ausgegangen werden, dass im Laufe der Zeit sämtliche Pflanzen für diesen Prozess herangezogen wurden. Je nach Region und technischen Entwicklungsstand konnten das Hanf, Flachs, Bambus, Esparto, Getreide, Baumwolle, Eukalyptus und Hölzer wie Fichte, Buche, Birke, Kiefer sein.<sup>31</sup> Bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts kamen hauptsächlich *Hadern* (Lumpen) oder *Zellstoffe* zum Einsatz, die von Hand zerkleinert, gereinigt und mit Wasser in einer Bütte aufgeweicht wurden.<sup>32</sup> Hadern bestanden aus Wäsche, Säcken, Netzen und anderen nicht mehr verwendeten Faserstoffen aus den Haushalten der Menschen. Sie wurden ursprünglich aus Leinen, Flachs oder Hanf hergestellt und für die Papierproduktion recycelt. Der wässrige Faserbrei wurde anschließend durch eine Schöpfform gegossen, welche aus einem Holzrahmen mit einem eingespannten feinmaschigen Sieb bestand. Durch Bewegung des Siebes verfilzen sich die Fasern zu einem Blatt und konnten anschließend in einer Spindelpresse zu einem Bogen Papier verpresst werden.<sup>33</sup> Die händische Papierproduktion hat sich in kunsthandwerklichen Nischen bis heute erhalten und erfreut sich abseits massenhafter Papierproduktion einer steigenden Beliebtheit.

### 1.5.1 Grundlagen und Rohstoffe der Papierproduktion

Die Stoffaufbereitung, der erste Schritt der Papierproduktion, erzeugt Halbstoffe, die auf mechanische oder chemische Weise entstehen können. Ziel ist die Gewinnung von Zellulosefasern, die in den Hölzern zu ca. 40 – 50% enthalten ist. Asunción hebt in seinem Buch *Das Papierhandwerk* ihre positiven Eigenschaften hervor und zählt u.a. die Widerstandsfähigkeit gegen Zugkraft, die Anpassungsfähigkeit (Flexibilität, Formbarkeit), den Widerstand gegen plastische Verformung, die Hydrophilität, die chemische Stabilität sowie die Recyclingfähigkeit auf.

#### Nadelhölzer

Die weltweit zur Papiergewinnung herangezogenen Fasern werden zu ca. 75% aus *Nadelhölzern* gewonnen. Diese Koniferen verfügen über einen sehr hohen nutzbaren und homogenen Faseranteil, eine gleichmäßige Aststruktur und gerade Stämme. Daher erhöhen die Faserbreie aus Nadelhölzern die Festigkeit des Papiers messbar und finden vor allem in der Produktion von Kraftpapieren Anwendung.

---

<sup>31</sup>Oligmüller, G. et al.: Papier - Vom Handwerk zur Massenproduktion, S. 73ff. [Oli01]

<sup>32</sup>Als *Bütte* wird ein großer Eimer oder Bottich bezeichnet. Er ist Namensgeber für das *Büttenpapier*.

<sup>33</sup>Gabel, A. et al.: Das Papier wandert von Asien nach Europa, S. 6. [Gab90]

### Laubhölzer

Eine weitere Quelle für Holzfasern stellen die *Laubbäume* dar. Ihr Holz ist im allgemeinen härter und ihre Fasern sind kürzer. Die Faserstruktur ist heterogener und die Stämme sind weniger gerade als die der Koniferen. Dies machte sie lange Zeit uninteressant für die Papierherstellung. Neue Produktionsverfahren sind mittlerweile in der Lage, diese Nachteile auszugleichen und den großen Bestand an Laubgehölzen für die Papierproduktion zu nutzen. Obwohl die Fasern von Laubbäumen über schwächere Festigkeitseigenschaften verfügen, werden sie im Herstellungsprozess beigemischt, da sie die Optik und Haptik des Papiers positiv beeinflussen können.

### Nichthölzer

Neben Nadel- und Laubhölzern existieren weitere Faserquellen, die als *Nicht-Hölzer* zusammengefasst werden. Diese Fasern sind in ihrem Aufbau sehr unterschiedlich, was eine direkte Einstellung der gewünschten Faserbrei-Eigenschaften ermöglicht. Hier können die Hauptgruppen der *natürlich gewachsenen Pflanzen*, der *Landwirtschaftsabfälle* und der *für die Papierproduktion angebauten Pflanzen* unterschieden werden. Die wichtigsten Nicht-Hölzer in der Papierproduktion sind Flachs, Hanf, Kenaf (Malvengewächs), Getreidestroh, Bagasse (Produktionsreste des Zuckerrohrs), Espartogras, Baumwolle und Sisal.

Um die genannten Faserquellen nutzen zu können, greift die Papierindustrie auf drei grundsätzlich verschiedene Erzeugungsmethoden zurück:

1. Frischfasern aus mechanischer Gewinnung  
Hölzer wie Fichte, Kiefer, Birke und Eukalyptus dienen als Quelle für *Holzschliff* und *Holzstoff*. Erstgenannter entsteht durch die Herauslösung kurzer Fasern mithilfe eines rotierenden Schleifsteins. Zweitgenannter wird erzeugt, indem das Holz zwischen zwei rotierende Scheiben (Refiner) zerfasert wird.
2. Zellstoff aus chemischer Gewinnung  
Hölzer und seltener auch Graspflanzen werden mit dem *basischen Sulfatverfahren* behandelt.<sup>34</sup> Dabei werden wichtige Bestandteile des Holzes in einer Kochlauge herausgelöst und abgeführt. So erzeugte Papiere enthalten 100% Zellstoff und werden als *holzfrei* bezeichnet.<sup>35</sup>
3. Recyclingfasern aus chemischer Gewinnung  
Altpapier wird zunächst in Wasser aufgelöst, von Druckfarbe befreit (De-Inking), in mehreren Schritten gereinigt und anschließend gebleicht. Dies ermöglicht die mehrfache Nutzung von Papierprodukten. Nachteilig wirken sich dabei die immer weiter verkürzten Zellulosefasern aus. Deshalb wird bei reißfesteren Papieren ein geringer Anteil an Frischfasern zugeführt. Im Jahr 2013 betrug die *Altpapiereinsatzquote* für die gesamte Produktion von Papier, Karton und Pappe 74% und reduziert somit den Frischfaseranteil auf ein Viertel.<sup>36</sup>

<sup>34</sup>UPM (Hrsg.): So entsteht Qualitätspapier, S.12 [UPM14]

<sup>35</sup>Oligmüller, G. et al.: Papier - Vom Handwerk zur Massenproduktion, S. 91.[Oli01]

<sup>36</sup>VDP: Papier Kompass 2014. [VDP15]

### 1.5.2 Produktionsablauf

Seit Beginn der Papierproduktion hat sich am Grundprinzip der dreigeteilten Produktion nichts geändert, doch sind die maschinellen Aufwendungen extrem gestiegen. Moderne Papiermaschinen sind technologisch anspruchsvolle, hochkomplexe und extrem große Anlagen, die ganze Industriehallen ausfüllen. Sie bestehen aus den drei Hauptteilen *Nasspartie*, *Trockenpartie* und *Nachtrockenpartie mit Aufrollung*. Je nach Produktionsart werden Langsiebmaschinen, Rundsiebmaschinen, Schrägsiebmaschinen sowie Former unterschieden. Die nacheinander angeordneten Produktionseinheiten können eine Länge von 200 Metern und eine Breite von bis zu 11 Metern erreichen. Mit einer Geschwindigkeit von bis zu 2.000 m/min werden mehrere Bahnen Papier mit einer Maximalbreite von 4,5 Metern parallel verarbeitet.<sup>37</sup> Die Fertigung erfolgt dabei vollautomatisch mit einer ständig ablaufenden Qualitätskontrolle, welche die Messung der Grammatik und der Papierfeuchte einschließt. Folgende drei Arbeitsschritte werden unterschieden:

#### 1. Nasspartie

Die Papierbahnbildung erfolgt im Sieb bzw. dem Former der Nasspartie. Die Grundlage bildet eine Fasersuspension, die aus 99% Wasser und 1% Fasermaterial besteht. Sie wird in einem *Pulper* (Stofflöser) produziert und wird auf die *Siebpartie*, einem sehr engmaschigen Kunststoffsieb, aufgebracht. Dieses Sieb gibt durch seine Struktur die späteren Eigenschaften des Papiers vor. Unter Abfluss einer großen Menge des Suspensionswassers verteilen sich die Fasern gleichmäßig und bilden eine hauchfeine Papierschicht. Diese wird nun in die *Presspartie* geführt, wo auf einer Filzbahn weiteres Wasser herausgepresst wird. Weitere Pressvorgänge folgen, wonach die Papierbahn je nach Maschine noch einen Feuchtegehalt von 48 – 60% aufweist. Durch Einsatz verschiedener Siebeinheiten können mehrlagige Papiere durch maschinelles Vergautschen hergestellt werden.

#### 2. Trockenpartie

Im nachfolgenden Abschnitt der Trocknung läuft das Papier über erhitzte Zylinder hinweg, verliert hier einen weiteren Großteil an Wasser und besitzt am Ende einen Feuchtegehalt von 3 – 8%.<sup>38</sup>

#### 3. Nachtrockenpartie mit Aufrollung

Zur Einstellung bestimmter Papiereigenschaften wird die Bahn in der Leimpresse mit verschiedenen Hilfsmitteln versetzt. Die Produktion des so genannten *Rohpapiers* ist nun abgeschlossen und es erfolgt die Weiterverarbeitung, um das Produkt selbst, seine Oberflächenerscheinung und seine substantielle Struktur bestmöglich auf die gewünschte Funktion anzupassen. (siehe Kapitel 1.5.3) Nach Abschluss dieses Prozesses wird die Papierbahn aufgewickelt und als *Tambour* seiner weiteren Bestimmung zugeführt.

---

<sup>37</sup>vgl. VDW: Basiswissen Wellpappe, 2014, S. 15ff. [VDW14a]

<sup>38</sup>UPM (Hrsg.): So entsteht Qualitätspapier, S.20 [UPM14]

### 1.5.3 Oberflächenbehandlung und Weiterverarbeitung

Maschinelle Veredelungen des Papiers verändern entweder ausschließlich die äußerliche Erscheinung oder greifen tief innere Struktur ein. Dabei kann es sich um eine *Formveränderung* oder eine *Oberflächenveredelung* des Papierproduktes handeln. Erstgenannte hat entweder eine *Stabilitätserhöhung* durch Faltung oder Wellung zum Ziel oder eine Veränderung der äußeren Erscheinung aus ästhetische Vorgaben. Zweitgenannte wird angewendet, um das Papier auf seine Bestimmung als Schreib- oder Druckpapier vorzubereiten oder ihm spezielle Eigenschaften wie *Nassreißfestigkeit* oder *Fettdichtigkeit* zu verleihen. Nachfolgend sind Methoden der Weiterverarbeitung von Papierprodukten differenziert.

#### Formveränderung

Papiere werden überwiegend als Rollenware oder bei höheren Grammaturen als Bögen produziert und haben durch die Art der Produktion mit Walzen und Rollen eine ebene Oberfläche. Werden bestimmte statische Eigenschaften des finalen Papierproduktes gewünscht, kann das vormals flache Produkt durch maschinelle Eingriffe in einen räumlichen Zustand versetzt werden. Beispielhaft sein hier das Wellenpapier genannt, das als Zwischenprodukt zur Herstellung von Wellpappe dient. Die Wellenform wird mithilfe von Wärme, Feuchtigkeit und entsprechend geformten Riffelwalzen in die Papierbahn eingepresst. Dieser Eingriff bezieht sich auf die gesamte Rollenbreite. Die *Prägung* ermöglicht die Formveränderung von Papieren in bestimmten Bereichen. Sie werden vor allem angewendet, um das Produkt für haptischer und dadurch hochwertiger erscheinen zu lassen. Ein weiteres Beispiel für eine Formveränderung stellt die *Faltung* des Papierbogens dar. Hierbei werden Segmente des Papiers an vordefinierten Stellen umgebogen und erzeugen eine räumliche Form, die durch Verklebung oder mittels Steckverbindungen zusammenhalten. Diese Art wird häufig zur Erzeugung kleinerer Verpackungen z.B. für Schmuck verwendet und erzielt ihre Stabilität einzig aus der räumlichen Faltung.

#### Glättung

Das noch feuchte und durch den hohen Faseranteil noch raue Papier wird zwischen Walzenglättwerken hindurchgeführt. Hierbei erfolgt eine Vereinheitlichung der Oberfläche und eine Reduzierung der Dicke. Durch die Abwechslung von harten Stahlwalzen und weichen, mit Papier umwickelten Walzen wird eine glänzende Oberfläche Papierbahn erreicht.<sup>39</sup> Diese so genannten *MF-Papiere* (maschine finished) werden vor allem im Druckbereich eingesetzt. Wird eine noch feinere Oberflächenqualität gewünscht, erfolgt eine Nachbehandlung auf dem *Superkalandar*. Er "... besteht aus zehn bis zwölf übereinander angeordneten elastischen Walzen und [...] Hitze, Druck und die Reibung im Walzenspalt machen die Papieroberfläche glatt und glänzend."<sup>40</sup> Dieser Vorgang wird als *Satinierung* bezeichnet und erzeugt die so genannten *SC-Papiere* (super calandered).

<sup>39</sup>Oligmüller, G. et al.: Papier - Vom Handwerk zur Massenproduktion, S. 115.[Oli01]

<sup>40</sup>UPM (Hrsg.): So entsteht Qualitätspapier, S.21. [UPM14]

### Leimung

Die Oberfläche von Papier ist nicht ausschließlich durch mechanische Einflüsse zu veredeln. Bei der Leimung werden die Unebenheiten der Oberfläche aufgefüllt und glatt gezogen. Zunächst wurden Tierleime eingesetzt, mit den Papiermaschinen wurde auf Harzleime umgestellt. “Das Papier durchläuft dabei den Walzenspalt einer Leimpresse oder ein Stärkebad. Durch die Leimung erhöhen sich die Oberflächenfestigkeit und die Feuchtigkeitsbeständigkeit. [...] Im Allgemeinen ist die Leimpresse in die Trockenpartie der Papiermaschine integriert.”<sup>41</sup>

### Imprägnierung

Fritz Ohl beschreibt eine Imprägnierung als eine gänzliche Durchdringung des Produktes mit einem imprägnierenden Stoff. Dies ist auf die lateinische Bedeutung des Wortes *impraegnare* zurückzuführen, was *einverleiben* oder *schwängern* bedeutet. Er definiert somit einen “Leib, in den etwas eindringt” und “Stoffe in ihm”, welche einverleibt werden.<sup>42</sup> Ziel einer Imprägnierung ist die Verbesserung ursprünglicher, beziehungsweise die Zufügung gänzlich neuer Eigenschaften des Papierproduktes. In diesem Zusammenhang sei auf das Buch *Imprägnieren von Papier und Pappe* von Fritz Ohl verwiesen, wo die einzelnen Imprägnierstoffe und die zugehörigen Maschinen sehr ausführlich dargestellt werden. Hinzuzufügen ist, dass seit der Veröffentlichung dieses Werkes viele weitere Methoden der Imprägnierung von Papieren entwickelt wurden, auf die an dieser Stelle jedoch nicht tiefergehend eingegangen wird. Ohl definiert dort vier Aufgaben von Imprägnierungen:

1. Veränderung der mechanischen Eigenschaften zur Steigerung der Stabilität.
2. Resistenzerhöhung gegen klimatische Beanspruchungen wie Temperaturschwankungen, Feuchte, Trockenheit, Lichteinstrahlung, Wärmestrahlung, Schimmel und Bakterien.
3. Dichtigkeit gegen Flüssigkeiten, Fette und Gase sowie den Schutz gegen Oxydation, Aromaverlust oder Übernahme von Fremdgerüchen.
4. Unempfindlichkeit gegen besondere Wirkungen wie Korrosion, Schädlinge, chemische Einflüsse, Heißsiegel und Sterilisation.<sup>43</sup>

Werden Papierwerkstoffe im architektonischen Kontext eingesetzt, bekommt der Imprägnierung eine besondere Bedeutung zu. Einerseits soll diese die Empfindlichkeit des Materials gegenüber Feuchtigkeit und anderen Stoffen erhöhen. Andererseits muss die Oberflächenbeschaffenheit erhalten bleiben, damit Verklebungen sachgerecht ausgeführt werden können. Auch ist die Resistenz gegenüber Schädlingen soweit zu erhöhen, dass diese keine Gefahr für die statische Integrität darstellen. Die bedingenden Parameter sind vor Auswahl der Imprägnierung zu klären und können einen erheblichen Einfluss auf die Qualität sowie die Leistungsfähigkeit des Papiers haben.

---

<sup>41</sup>ebenda. [UPM14]

<sup>42</sup>Ohl, F.: *Imprägnieren von Papier und Pappe*, S. 7. [Ohl54]

<sup>43</sup>ebenda, S. 10. [Ohl54]



### Streichung

Schreib- und Druckpapiere werden maschinell gestrichen, um eine einheitliche und hochwertige Oberflächenqualität zu erreichen. Bei der Produktion werden Streichfarben aus Pigmenten und Bindemitteln auf das Rohpapier aufgetragen, glatt gezogen und getrocknet. Die Oberfläche ist fein, eben und geschlossen. Bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts wurde das Streichmittel mit Bürsten aufgetragen. Nach und nach wurde aber dazu übergegangen, gussgestrichene Papiere zu produzieren. Hierbei wird die Streichmasse auf die Papierbahn gegossen, bevor sie zwischen zwei Walzen hindurchgeführt wird. "Die Streichfarbe enthält Pigmente (Kaolin, Talkum, Calciumcarbonat), Bindemittel (Stärke, Latex) und andere Zusatzstoffe. Das Papier wird ein-, zwei- oder dreimal ein- oder beidseitig gestrichen; die aufgetragene Menge variiert zwischen 3 und 40g/m<sup>2</sup> pro Seite." Je nach Intensität der Streichung werden leicht gestrichene *LWC-Papiere* (light weight coated) oder normal gestrichene *HWC-Papiere* (heavy weight coated) erzeugt.<sup>44</sup>

### Beschichtung

Im Gegensatz zur Imprägnierung dringen die Beschichtungen, mit denen Papierprodukte behandelt werden, nicht gänzlich in das Papier ein, sondern bilden einen Oberflächenfilm mit den gewünschten Eigenschaften. Zielstellung und Mittel sind häufig gleichzusetzen, weshalb eine strikte Trennung zwischen Imprägnierung und Beschichtung nicht möglich ist. In manchen Fällen ist eine komplette Durchdringung des Materials unerwünscht, da hierbei die Papierfasern zu stark beeinträchtigt werden könnten oder die Stabilität des Papiers durch den zu hohen Eintrag an Feuchte in Mitleidenschaft gezogen würde. Während bereits imprägnierte Papiere häufig noch eine zusätzliche Beschichtung erhalten, um verschiedene Funktionen in einem Produkt erfüllen zu können oder einen gewünschten Effekt zu verstärken, ist eine Imprägnierung nach einer Beschichtung ausgeschlossen, "... denn die Beschichtung setzt ja einem Eindringen anderer Stoffe in den Faserverbund bestimmungsgemäß größten Widerstand entgegen."<sup>45</sup>

Neben dem Begriff der Beschichtung wird häufig auch der Terminus *Befilmung* gebraucht, was eindeutiger auf die Applikation eines Lack-Films oder ähnlichen Stoffes hinweist. Beschichtete Papiererzeugnisse sollen hauptsächlich eine abweisende Eigenschaft gegenüber Feuchte und Fett besitzen. Weitere gängige Materialien sind Kunststoffe und Wachse, die durch Anstriche oder Lackierungen aufgebracht.

Wachs wurde bereits sehr früh verwendet, um Papier aufzuhellen, es mit einem transluzenten Glanz zu versehen und die Stabilität zu erhöhen. Erste Aufzeichnungen über derartige Behandlungen lassen sich bis in die Regierungszeit der chinesischen Tang-Dynastie (618 – 907 n. Chr.) zurückverfolgen. Das so veränderte Papier wurde *ying huang* (steif und gelb) genannt und wurde vor allem von Künstlern geschätzt.<sup>46</sup>

<sup>44</sup>UPM (Hrsg.): So entsteht Qualitätspapier, S.21 und 32f. [UPM14]

<sup>45</sup>Ohl, F.: Imprägnieren von Papier und Pappe, S. 8. [Ohl54]

<sup>46</sup>Tsuen-Hsueh, T.: Paper and Printing, in: Science and Civilisation in China, S. 78. [Nee93]

### Kaschierung

Das einseitige Verbinden von zwei oder mehreren flächigen Materialien oder Papieren wird als Kaschierung bezeichnet. Hauptsächlich verwendete Kaschiermittel sind Dispersionsklebstoffe, Wachse, Latexpolymere und Polyethylen-Verbindungen und haben die Verbesserung der Eigenschaften des Ursprungsmaterials zum Ziel. Mit einer Kaschierung werden Papiererzeugnisse mit einer Schutzschicht überzogen. Beispiele sind hochwertiges, bedrucktes Papier auf stärkerem Pappenuntergrund oder Aluminiumfolie auf Papier wie bei Zigarettenschachtel.<sup>47</sup> Eine Kaschierung wird in der Fachwelt als einseitig eingestuft, da ein Trägermaterial auf einer Seite mit dem Kaschiermittel (z.B. Folie) überzogen wird. Die Ausrichtung der Leistungsverbesserung des kaschierten Materials erfolgt somit für eine definierte Seite. Zu beachten ist die Gefahr der Oberflächenkrümmung des Trägermaterials bei Einsatz verschiedenartiger Materialien.

### Laminierung

Im Gegensatz zur Kaschierung erfolgt die Laminierung beidseitig und steht für "das Überziehen eines Druckbogens mit einer Acetat-, Polypropylen- oder Opp-Folie unter Verwendung eines Lösungsmittel- oder Dispersionsklebers."<sup>48</sup> Der Begriff *einseitige Laminierung* wird im Fachsprachgebrauch nur selten verwendet, da er besser als Kaschierung bezeichnet wird. Differenziert werden können das *Kaltlaminieren*, bei dem eine mit Klebstoff beschichtete Folie aufgebracht wird und das *Heißlaminieren*, wo das Laminat erhitzt wird und dadurch einen festen, nicht lösbaren Verbund mit der Papierbahn eingeht.

### Zusammenfassung

Die hier vorgestellten Verfahren zur Oberflächenbehandlung stellen die wichtigsten Methoden zur Ertüchtigung von Papierwerkstoffen gegen die unterschiedlichsten äußeren Einflüsse dar. Die Industrie ist mittlerweile in der Lage, für nahezu alle Anforderungen die passende Verfahrensweise anzubieten. Dafür sind exakte Vorgaben zu definieren, da einige der Techniken gegenseitige Wechselwirkungen provozieren. So bietet ein mit Wachs beschichtetes Papier zwar eine gute Feuchteresistenz, jedoch wird sein Klebeverhalten negativ beeinflusst. Die zur Anwendung kommenden Methoden sind auf ihre ökologische und medizinische Unbedenklichkeit zu prüfen. Nachträgliche Ausdünstungen sind dabei ebenso auszuschließen wie das schleichende Nachlassen der gewünschten Wirkung. Im Hinblick auf die in dieser Arbeit vorgestellten Faltungen an Papierwerkstoffen ist auch zu klären, ob die durchgeführte Oberflächenbehandlung den Faltprozess weiter zulässt oder diesen einschränkt.

---

<sup>47</sup>vgl. ZFA Papierlexikon. [ZFA15]

<sup>48</sup>ebenda. [ZFA15]

## 1.6 Produkte

Papierprodukte wurden bis zur industriellen Revolution von Hand hergestellt. Die massenhafte Produktion begann mit der Entwicklung von Papiermaschinen und führte zu einer enormen Fülle an Papierprodukten, die nun preiswert, schnell und exakt produziert werden konnten. Professor Heinz Schmidt-Bachem beschreibt in seinem umfangreichen Werk *Beiträge zur Industriegeschichte der Papier-, Pappe- und Folien-Verarbeitung in Deutschland* diese Entwicklung sehr anschaulich und führt aus:

“Seit Ende des 14. Jahrhunderts war die Papier- und Pappeverarbeitung in Deutschland ausschließlich eine Angelegenheit des zunftgebundenen Handwerks. Ende des 18. Jahrhunderts wurden Spielkarten, Buntpapier, Papiermaché-Artikel, Tapeten, Kartonagen, Papierblumen oder Festartikel im Manufakturbetrieb hergestellt. Diese Bereiche gehörten im Übergang zum Fabrikzeitalter des 19. Jahrhunderts zu den begründenden Sparten der Papier und Pappe verarbeitenden Industrie. In den 1820er Jahren hatte die Industrialisierung der Buchbinderei begonnen. In den 1840er Jahren folgten die Bereiche Geschäftsbücher und Briefumschläge. Ab der zweiten Hälfte der 1850er Jahre entwickelte sich die Sparte der Papierwaren-Industrie.”<sup>49</sup>

Diese Industrie erzeugt mittlerweile ein sehr breites Produktspektrum. Um die angebotenen, sehr verschiedenen Papiererzeugnisse differenzieren zu können, erfolgt ihre Einteilung in Gruppen nach der flächenbezogenen Masse, auch *Massenbelegung* genannt. Häufig wird in einschlägiger Fachliteratur auch der Begriff Flächengewicht verwendet. Diese Bezeichnung ist zu vermeiden, da sie in Fachkreisen als nicht normgerecht angesehen wird.

Grundlegend ist zwischen einlagigen und mehrlagigen Papiergebilden zu unterscheiden. Werden mehrere feuchte Lagen Papier zusammengepresst entsteht *Pappe*, das über eine wesentlich größere flächenbezogene Masse verfügt. Die massebezogene Grenze zwischen einlagigen Papieren und mehrlagigen Pappen liegt bei  $225\text{g/m}^2$ . Um die unterschiedlichen Grammaturbereiche und Produktkategorien besser differenzieren zu können wurde in diesem Grenzbereich der Begriff *Karton* etabliert. Eine exakte Trennung zwischen den Gruppen Papier, Karton und Pappe kann nicht vorgenommen werden, denn schon im frühen 20. Jahrhundert wurde zwischen “begriffssicheren Gebieten” und “begriffsunsicheren Grenzgebieten” unterschieden.<sup>50</sup> Dieser Umstand hat sich bis heute nicht geändert und führt dazu, dass Grauzonen zwischen den Produktkategorien existieren. Dadurch entstehen häufig begriffliche Ungenauigkeiten, wenn *schweres Papier* und *leichte Pappe* die gleiche Bedeutung haben und *schwerer Karton* gleichbedeutend ist mit *leichter Pappe*. Dazu trugen nicht zuletzt verschiedene Normungen bei, welche die Grenzen unterschiedlich definieren und interpretieren.

<sup>49</sup>Schmidt-Bachem, H.: Beiträge zur Industriegeschichte der Papier-, Pappe- und Folien-Verarbeitung in Deutschland, S. 3. [SB09]

<sup>50</sup>ebenda, S. 527. [SB09]

### 1.6.1 Papier

Im Normenwerk der DIN 6735:2010-02 wird Papier als “flächiger, im Wesentlichen aus Fasern meist pflanzlicher Herkunft bestehender Werkstoff” definiert, der über eine flächenbezogene Masse von  $225\text{g/m}^2$  verfügt.<sup>51</sup> Eine Abgrenzung in leichte, mittelschwere und schwere Papiere erfolgt über Grammaturspannen. Nachfolgend werden anhand einiger Beispiele diese drei Gruppen erläutert.

#### Leichte Papiere

Das Kondensatorpapier zählt  $6\text{g/m}^2$  eines der leichtesten Papiere überhaupt. Mit ansteigender Grammatur folgen einige Sorten, deren Gewichtsspannen sich teilweise überschneiden. Beispielfhaft seien die Zigarettenpapiere ( $18 - 23\text{g/m}^2$ ), die Seidenpapiere ( $<25\text{g/m}^2$ ), die Skizzierpapiere ( $40 - 45\text{g/m}^2$ ) und die Dünndruckpapiere ( $25 - 60\text{g/m}^2$ ) genannt. Weitere Sorten mit extrem niedrigen Grammaturen kommen bei Spezialanwendungen zum Einsatz.

#### Mittelschwere Papiere

Zur Gruppe der mittelschweren Papiere zählen u.a. Zeitungspapiere ( $45 - 50\text{g/m}^2$ ), Schreibpapiere ( $60 - 90\text{g/m}^2$ ) und Standard-Druckerpapiere ( $80 - 90\text{g/m}^2$ ). Diese Gruppe macht den größten Anteil aus und wird vor allem von graphischen Papieren gebildet.

#### Schwere Papiere

Kunstdruck- und Spezial-Druckerpapiere ( $90 - 130\text{g/m}^2$ ) werden den schweren Papieren zugeordnet, ebenso wie Aquarellpapiere ( $120 - 850\text{g/m}^2$ ), welche durch ihre große Masse bis in den Bereich des Kartons und der Pappe hinein reichen können.

Die Unterscheidung der Papiersorten nach ihrer flächenbezogenen Masse lässt sich beliebig fortsetzen, denn die Industrie stellt eine unüberschaubare Vielfalt bereit. Neben der Einteilung in Grammaturbereiche können die Papiere auch nach ihren Eigenschaften differenziert werden, die sie teilweise durch die Kombination mit anderen Stoffen oder durch spezielle Produktionsverfahren erhalten haben. Beispielfhaft seien hier *nassfeste Papiere* (Zugabe von von chemischen Naßfestmitteln), *beschichtete Papiere* (Auftrag von Lacken, Schmelzen oder Dispersionen), *Wachspapiere* (Imprägnierung mit Wachs, Paraffin oder Kunststoffmischungen für eine Wasserunempfindlichkeit), *Krepp-Papiere* (Dehnbarkeitserhöhung durch verkürzte Papierbahnen), *synthetische Papiere* (Synthetikfasern mit Bindemitteln erhöhen die Strapazierfähigkeit) und *Wellenpapiere* (Wellenstoff zur Herstellung von Wellpappe) genannt.<sup>52</sup>

---

<sup>51</sup>DIN 6735: Papier, Pappe und Faserstoffe, Februar 2010, S. 20. [DIN10]

<sup>52</sup>Göttsching, L. (Hrsg.): Papier in unserer Welt - Ein Handbuch, S. 220 ff. [Göt90]

### 1.6.2 Pappe

Der Begriff *Pappe* stammt vom Wort *pappen* ab, das umgangssprachlich für *ankleben*, *andrücken* oder *haften* steht und bezieht sich somit auf die Mehrschichtigkeit des Produktes. Die Entstehung verlief parallel zur Entwicklung des Papiers im frühen China vor über 2.000 Jahren. In Europa kam das Material im 13. Jahrhundert n. Chr. auf und wurde zunächst für Spielkarten, später auch für Bucheinbände und Verpackungen verwendet. Im Laufe der Zeit sind unzählbar viele Variationen entstanden, so auch Röhren, welche aus gewickelten Papierbahnen bestehen. Ihrem Ursprung nach müssten sie bei den Papierprodukten zugeordnet werden, doch hat sich im Sprachgebrauch wie auch in der praktischen Anwendung der Begriff *Pappröhre* durchgesetzt. Deshalb wird zwischen ebenen Bögen und Röhren aus Pappe unterschieden.

#### Pappbögen

Papierprodukte mit einer Grammatur von mehr als 600g/m<sup>2</sup> werden in der DIN als *Pappe* oder *Vollpappe* geführt.<sup>53</sup> Pappe wird als "massiver (im Gegensatz zur Wellpappe) im Wesentlichen aus Fasern meist pflanzlicher Herkunft bestehender Werkstoff" definiert, "dessen flächenbezogene Masse im Regelfall oberhalb derjenigen für Karton liegt."<sup>54</sup> Ab 1.000g/m<sup>2</sup> wird üblicherweise nicht mehr nach der Grammatur klassifiziert sondern nach der Dicke des Werkstoffes in Millimetern. Diese Pappen gehören zu einer kleinen Gruppe von Nischenprodukten für Spezialanwendungen.

#### Pappröhren

In seinem Beitrag *Die Herstellung der Papphülsen* im von Walter Hess herausgegebenen *Praktischen Handbuch für das Gesamtgebiet der Pappen-Verarbeitung* hat Carl Url bereits 1930 die Produktionsweise von Pappröhren beschrieben. Hierbei gehen er und seine Mitautoren detailliert auf die Produktion von gewickelten Papieren ein: "Zu Papphülsen aus Papier gewickelt können alle Papiersorten verwendet werden mit Ausnahme von sehr harten Papieren, die Leim nicht festhalten. Auch sollen die Papiere nicht geglättet sein, sondern der Leim soll in die Poren eindringen können. [...] Der Kleisterverbrauch ist bei Verwendung dünneren Papiers allerdings größer, dafür werden die Hülsen fester und die Wandstärke kann entsprechend verringert werden."<sup>55</sup> Der Autor versteht unter Papphülsen bzw. -röhren "... alle in verschiedenen Formen verwendeten Hohlkörper, die entweder als Futteral oder als Schutz eines anderen Körpers dienen und aus Papier gewickelt sind."<sup>56</sup>

Der Produktionsprozess von Pappröhren unterscheidet sich von Pappbögen dahingehend, dass erstgenannte aus einer kontinuierlich aufgewickelten und verklebten Papierbahn bestehen während zweitgenannte aus einzelnen Papierschichten vergautscht werden. Pappröhren finden in der heutigen Zeit vor allem als Träger von Rollenware Anwendung. Die Spanne reicht hierbei von der einfachen Kassenrolle mit Thermodruckpapier über Toilettenpapier und Plotterpapieren bis hin zu Bodenbelägen.

<sup>53</sup>ebenda. S. 285. [Göt90]

<sup>54</sup>DIN 6735: Papier, Pappe und Faserstoffe - Übersicht von Begriffen, Februar 2010, S.27. [DIN10]

<sup>55</sup>Url, C., in: *Praktisches Handbuch für das Gesamtgebiet der Pappen-Verarbeitung*, S. 212. [Hes30]

<sup>56</sup>ebenda, S. 212. [Hes30]

### 1.6.3 Karton

Durch mehrfaches Schöpfen in mindestens drei, nicht zwingend gleichartigen Lagen, wird ein Papier mit größerer Dicke erzeugt, das als Karton bezeichnet wird. Die flächenbezogene Masse liegt zwischen Papier und Pappe. Der Begriff *Karton* (abgeleitet vom frz. *carton* bzw. dem ital. *cartone* für *starkes Papier*) wurde eingeführt, um dem Grammaturn-Bereich zwischen 150 – 600g/m<sup>2</sup> eine eigene Bezeichnung zu geben und eine Abgrenzung zwischen Papier und Pappe zu schaffen. Er ist u.a. in DIN 6730 aus dem Jahr 1985 festgelegt. In den nachfolgenden Revisionen dieser Norm findet sich ein Verweis auf die DIN 6735. Hier findet sich jedoch keine massebezogene Abgrenzungen zu Papier und Karton mehr. In der allgemeinen Deutung der Fachleute hat sich aber die Grenzziehung zwischen Karton und Pappe bei 600 g/m<sup>2</sup> erhalten.<sup>57</sup> Die äußeren Lagen des Kartons dienen der Festigkeit und die inneren Schichten erzeugen die gewünschte Stärke des Materials. Bei der Produktion von Karton kommen hochwertigere Ausgangsstoffe als bei Papier zum Einsatz. Die Fügung der Schichten erfolgt ohne den Einsatz von Klebstoffen oder Bindemitteln durch vergautschen. Dabei werden die noch nassen Papierbahnen in einer Rund- oder Langsiebmaschine oder einer kombinierten Rundsieb-Langsiebmaschine miteinander verpresst.<sup>58</sup> Durch die Mehrlagigkeit erfährt Karton eine extreme Versteifung, da auch Schichten mit unterschiedlicher Stärke miteinander vergautscht werden können.

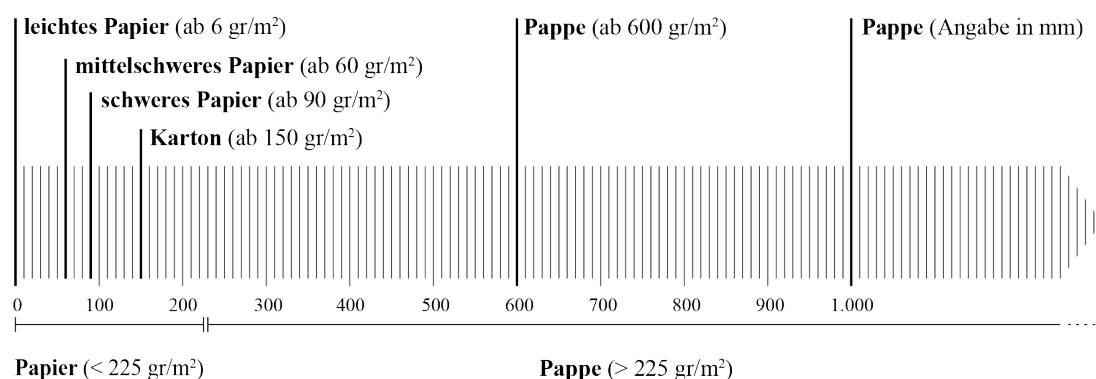


Abbildung 1.5: Grammaturbereich von Papier, Karton und Pappe

Eine weitere Unterteilung in *leichte* und *schwere* Untergruppen wie bei den Papieren ist bisher nicht vorgenommen worden. Vielmehr werden die Kartone durch die Art ihrer Oberflächenbehandlung und der damit einhergehenden Erscheinung differenziert. Diese Bearbeitung auf einer oder beiden Seiten des Kartons wird durchgeführt, um das Produkt für sein späteres Anwendungsgebiet zu veredeln. Eine Glättung oder Satinierung wird durch Streichen mit Pigmenten erreicht, wodurch die Bedruckbarkeit enorm verbessert wird. Eine Aufwertung der Haptik wird durch *gaufrieren* erreicht, einer speziellen Prägetechnik, die den Karton mit fühlbaren Strukturen versieht.

<sup>57</sup>DIN 6735: Papier, Pappe und Faserstoffe - Übersicht von Begriffen, Februar 2010, S.14. [DIN10]

<sup>58</sup>Göttsching, L. (Hrsg.): Papier in unserer Welt - Ein Handbuch, S. 263. [Göt90]

### 1.6.4 Mischformen

Papierprodukte, welche aus einem Papiergemisch, Wasser sowie Zuschlagstoffen bestehen und in den meisten Fällen nicht in eine ebene Form gebracht werden, sind als Sonderformen zu betrachten. Der Herstellungsprozess ist simpel und wird - mit Ausnahme des Fasergusses größtenteils von Hand ohne maschinelle Unterstützung durchgeführt. Diese Produkte haben sich in der Nische als Handarbeitserzeugnisse erhalten und werden kunstgewerblich zur Herstellung von Skulpturen, Plastiken oder Masken verwendet. In der industriellen Papierproduktion spielen sie keine Rolle.

#### Faserguss

Produkte, welche aus einem flüssigen Papierbrei hergestellt sind, der in Formen gegossen und bei Bedarf verpresst wird, werden als Faserguss bezeichnet. Die Methode geht auf den Erfinder des Bierdeckels Robert Sputh zurück, der im Oktober 1892 ein Verfahren patentieren lies, mit dem Objekte aus flüssigen Papierbrei in runde Formen gegossen werden konnten.<sup>59</sup> Dieses Verfahren wurde von Walter Hess noch als *Pappenguß* bezeichnet, "welches ermöglicht, direkt aus der breiigen Holzstoffmasse Kartonagen herzustellen."<sup>60</sup>

In der heutigen Zeit werden aus diesem Material hauptsächlich die Umverpackungen für Eier, die inneren Halteformen von Verpackungen für elektronische Geräte und Einwegprodukte der Pflege- und Medizinsparte produziert. Durch den hohen Zellstoffanteil wird von den Produzenten eine biologische Abbaubarkeit von 100% beworben. Die flüssige Form des Rohstoffes ermöglicht dabei die Einfärbung mit Pigmenten. Wasserdicht werden die Produkte durch eintauchen in Wachs. Nach dem II. Weltkrieg ging die Herstellungsmenge von Faserguss stetig zurück, da einerseits viele Fabriken zerstört wurden und kostengünstigere Kunststoffe aufkamen. Diese boten neben einer kostengünstigeren Herstellung zudem vielfältigere Möglichkeiten der Produktgestaltung. Seit den 1990 Jahren kommt es zu einem Wachstum der Fasergussproduktion. Dies ist auf eine steigende Umweltorientierung der Konsumenten, die Verpackungsverordnung von 1991 (Verpflichtung der Hersteller zur Rücknahme ihrer Verpackungen) und die leichte Rückführbarkeit der Fasergussprodukte in den Recyclingkreislauf zurückzuführen.

#### Pappmaché

Ein in Form gebrachter Brei aus Papier, Wasser und einem Bindemittel wird als *Pappmaché* oder *Papiermaché* bezeichnet. Der Begriff wird vom französischen *papier mâché* abgeleitet und beschreibt *zerkautes oder zerkleinertes Papier*. Zu Beginn des 19. Jahrhunderts befand sich die Produktion von Pappmaché auf ihrem Höhepunkt. Es überzeugte durch seine Vielseitigkeit, denn neben der Imitation wertvoller Gegenstände war es leicht, unzerbrechlich und preisgünstig.<sup>61</sup> Das Verfahren wurde ungefähr zur gleichen Zeit wie die Papierproduktion im China des 2. Jahrhunderts entwickelt.<sup>62</sup> Ab dem 17. Jahrhundert wurde Pappmaché in Westeuropa für vielfältige Einsatzgebiete hergestellt.

<sup>59</sup>Patent Nr. 68499 für einen *Holzfilzplatten oder Faserguß-Untersetzer* vom 25. Oktober 1892

<sup>60</sup>Hess, W. (Hrsg.): *Pappen-Verarbeitung und Papiermaché*, S. 67. [Hes24]

<sup>61</sup>Göttsching, L. (Hrsg.): *Papier in unserer Welt - Ein Handbuch*, S. 285. [Göt90]

<sup>62</sup>vgl. Weber, T.: *Die Sprache des Papiers*, S. 171. [Web04]

Produziert wurden u.a. Gebrauchsartikel (Dosen, Büchsen, Puppen, Spielwaren), Papierstuck (Innendekoration und Wandverkleidung), Möbel (Füllung und Verzierungen) und Baustoffe (Ziegel, Kuppeln, Röhren).<sup>63</sup> Das Material ist auch als *Pulpe* oder *Cartapesta* (ital.) bekannt. Hierbei wird Papier zerkleinert, in Wasser aufgeweicht und mit Kleister versetzt. Diese Masse wird anschließend nach Belieben geformt und behält nach der Trocknung an der Luft oder durch Zuführung von Wärme die erstellte Form bei. Durch Zugabe weiterer Zuschlagstoffe wie Ton oder Kreide lassen sich die farbliche Erscheinung und Beschaffenheit des Endproduktes beeinflussen. Zur Herstellung können die Methoden *Überformen* (Verkleidung von Holzformen mit Papiermasse oder Papierstreifen)<sup>64</sup>, *Drücken* (Pressung von Pulpe in Negativform) oder *Gießen* (Füllung einer Hohlform mit sehr flüssige Pulpe) angewendet werden.<sup>65</sup> Obwohl für die Produktion häufig Papierabfälle verwendet werden, ist von Bedeutung, dass diese Rohstoffe "keinen Schmutz enthalten und frei von Schmutz und Druckerschwärze sind, damit man eine tadellose Masse erhält."<sup>66</sup>

### Kaschiertechnik

In einigen Publikationen wird die *Kaschiertechnik* fälschlicherweise synonym zum Pappmasché verwendet. Hierbei kommen gerissene oder zugeschnittene Papierstreifen zum Einsatz, die ohne Zugabe von Wasser schichtweise verkleistert werden. Im Gegensatz zum Pappmasché wird auf das Einweichen der Ausgangspapiere verzichtet. Das hergestellte Produkt zeigt die ursprünglich verwendeten Streifen deutlich ablesbar auf und behält die erzeugte Form durch Austrocknung des Kleisters.

### Paper clay

Wird ein größerer Anteil Ton mit einem kleineren Anteil zerkleinertem Papier und Wasser zu einem Brei vermischt, entsteht *Paper clay*, der hauptsächlich zur Erstellung von Plastiken und Skulpturen verwendet wird. Die zugegebene Menge an Wasser definiert die Viskosität des Breis und erlaubt die Modellierung der gewünschten Form. Die Papierfasern übernehmen hierbei die Bewehrung der Tonmasse. In einem Brennvorgang werden die Papierfasern verbrannt und die Endform aus Ton bleibt erhalten.<sup>67</sup>

---

<sup>63</sup>Hess, W. (Hrsg.): Pappen-Verarbeitung und Papiermaché, S. 238 ff. [Hes24]

<sup>64</sup>Experten streiten darüber, ob diese Form der Herstellung noch zur Kategorie *Pappmaché* oder zur *Kaschiertechnik* zählt. (siehe Abschnitt "Kaschiertechnik")

<sup>65</sup>Göttsching, L. (Hrsg.): Papier in unserer Welt - Ein Handbuch, S. 285. [Göt90]

<sup>66</sup>Hess, W. (Hrsg.): Pappen-Verarbeitung und Papiermaché, S. 219. [Hes24]

<sup>67</sup>Gault, R.: Paper Clay, S. 7ff und S. 36ff. [Gau98]



## 2 Wellpappe und Wellpappenprodukte

Walter Hess lieferte 1930 eine Definition von Wellpappe, welche noch heute ihre Gültigkeit besitzt. Er beschreibt Wellpappe als "... pappeähnliches Erzeugnis, das man dadurch herstellt, daß man ihm eine eigentümliche wellenartige Gestalt gibt, auf der auch die große Festigkeit und vielseitige Verwendbarkeit beruht. [...] Wellpappe besteht nun aus einer Lage von ... geeignetem Papier, das man durch besondere Maschinen wellenförmig geprägt hat und je nachdem auf einer oder beiden Seiten mit je einer Lage von stärkerem Papier überzogen hat."<sup>1</sup> Otto Stobbe erweitert 1966 diese Definition. In seinem Beitrag *Aus der Geschichte der Wellpappe* in der Zeitschrift *Papiergeschichte* beschreibt er Wellpappe als "... pappeartiges Erzeugnis, das aus mehreren, teils glatten, teils heißgeriffelten Papierbahnen besteht, die wechselweise geschichtet aufeinandergeklebt sind."<sup>2</sup> Wellpappe wird trotz ihrer Namensgebung zur den Papierprodukten gerechnet, da sie aus Papierbahnen aufgebaut sind.

### 2.1 Entstehungsgeschichte

Das erste Patent für Wellpappe wurde am 7. Juli 1856 an Charles Healey und Edward Ellis Allen erteilt und beschrieb gewelltes Papier zum Einsatz als Schweißbänder in Hüten.<sup>3</sup> Das erste Patent mit der Nummer 122 023 für Wellpappe als Verpackungsmaterial erhielt der Amerikaner Albert L. Jones am 19. Dezember 1871.<sup>4</sup> Es bezog sich auf eine einseitige Wellpappe (siehe Kapitel 2.3.4). Die Umwidmung von Wellpappe als Verpackungsmaterial scheint demnach auf abgelegte Hutbänder zurückzuführen sein. Oliver Long experimentierte viel mit dem Material und zog eine zweite Lage Papier auf die einseitige Wellpappe. Das Patent hierzu wurde ihm 1874 erteilt und markiert die Geburtsstunde der Wellpappe wie sie heute bekannt ist. Im Laufe der Entwicklung kamen viele weitere Patente hinzu und belegen die Anziehungskraft des Materials als Forschungsobjekt.

Seit 1890 sind Boxen aus Wellpappe in Gebrauch, wobei sich das grundlegende Konstruktionsprinzip bis heute nicht verändert hat. Die gesamte Form der Wellpappe wird durch den eingebrachten Klebstoff fixiert und führt zu einer extrem stabilen Konstruktion, die eine hohe Robustheit gegen äußere Krafteinwirkung besitzt. Die Stabilität bei gleichzeitig sehr niedrigem Gewicht und günstigen Produktionskosten sind auch heute noch der Grund für den großflächigen Einsatz dieses Materials.

---

<sup>1</sup>Hess, W. (Hrsg.): Praktisches Handbuch für das Gesamtgebiet der Pappen-Verarbeitung, S. 93. [Hes30]

<sup>2</sup>Stobbe, O.: Aus der Geschichte der Wellpappe, in: Papiergeschichte, Heft 1-2/1966, S. 1. [Sto66]

<sup>3</sup>Hunter, D.: Papermaking: History and Technique of an Ancient Craft, S. 558. [Hun78]

<sup>4</sup>Schmidt-Bachem, H.: Aus Papier: Eine Kultur- und Wirtschaftsgeschichte der Papier verarbeitenden Industrie in Deutschland, S. 680. [SB11]

## 2.2 Kulturelle und technische Bedeutung

Wellpappe wird vor allem für Transportverpackungen eingesetzt. Laut dem Verband der Wellpappen-Industrie e.V. lag im Jahr 2013 der Anteil von Waren, die in Deutschland hergestellt und mit Wellpappe verpackt wurden, bei 68,9%. Der gesamte Absatz von Wellpappe in Deutschland betrug 2013 9,1 Mrd. Quadratmeter bzw. 4,7 Mio. Tonnen.<sup>5</sup> Die Vorteile liegen auf der Hand, denn mit dem Produkt lassen sich die Waren nicht nur sicher verpacken, sondern auch effizient transportieren und werbewirksam präsentieren. Es besteht überwiegend aus Rohstoffen auf Altpapierbasis und wird dem Recyclingkreislauf komplett zugeführt. Der wirtschaftliche Erfolg der Wellpappenindustrie und der innovative Entwicklungsstand seiner Produkte beruht auf einem hohen Grad der Normierung, die auch als Definitionsgrundlage dieser Arbeit dient. In diesem Zusammenhang sind hier die deutschen DIN-Normen<sup>6</sup>, die internationalen ISO-Normen<sup>7</sup>, die FEFCO-Codes<sup>8</sup> und die TAPPI-Normen<sup>9</sup> zu nennen. Während die beiden erstgenannten die exakten Eigenschaften, Produktionsprozesse und Abmessungen der Wellpappen normieren, definieren die beiden letztgenannten die international einheitlichen Codes, die für Verpackungen, deren Dimensionen und die Regeln für Testierung und Qualitätssicherung.

In der heutigen Zeit ist Wellpappe mit Abstand das wichtigste Produkt zur Verpackung von Gütern, da sie die hervorragende Schutzfunktion mit einer bedruckbaren und somit vermarktungsfähigen Oberfläche vereint. Sie wird hauptsächlich für die komplette Einhausung eines Produktes verwendet. Inspiriert durch die hervorragenden Eigenschaften dieses strapazierfähigen Materials erschloss sich die Industrie weitere Anwendungsgebiete, indem Wabenplatten aus Wellpappen entwickelt wurden. (siehe Kapitel 2.5)

## 2.3 Eigenschaften

Wellpappe wird durch die abwechselnde Fügung von zwei oder mehreren ebenen und gewellten Papierbahnen gebildet. Die Eigenschaften des Gesamtproduktes lassen sich demnach durch Änderung der Parameter der Einzelbauteile beeinflussen. Die *Wellenart*, also die Anzahl der verwendeten Wellenbahnen mit Zwischenlage, stellt hierbei den Parameter mit dem größten Einflussfaktor auf die Gesamteigenschaften dar. Die *Wellenform* hat einen erheblichen Einfluss auf die Stabilität der Wellpappe und die *Wellenrichtung* gibt die Längenausdehnung sowie die Breitenbegrenzung vor. Der Zusammenhang zwischen Wellenhöhe und Wellenteilung beschreibt das *Wellenprofil*, dessen Parameter die Stabilität beeinflussen und somit das spätere Einsatzgebiet der Wellpappe bestimmen. Einen weiteren wichtigen Faktor stellt die Art und die Qualität der Verbindung der Papierlagen dar. Nicht zuletzt werden die Erscheinung und die physikalischen Merkmale der Wellpappe von den Wellenpapieren und Decklinern bestimmt.

---

<sup>5</sup>VDW: Zahlen und Fakten 2014, Broschüre. [VDW14b]

<sup>6</sup>Deutsches Institut für Normung

<sup>7</sup>International Organization for Standardization

<sup>8</sup>European Federation of Corrugated Board Manufacturers

<sup>9</sup>Technical Association of the Pulp and Paper Industry

### 2.3.1 Physikalische, technische und chemische Attribute

Ähnlich wie Papiere und Papierwerkstoffe in Kapitel 1.4.1 beschrieben sind, können auch die Eigenschaften von Wellpappe und daraus hergestellten Produkten nach ihren physikalischen, technischen und chemischen sowie den optischen und haptischen Attributen bewertet werden. Dafür können subjektive Maßstäbe ebenso herangezogen werden wie exakte Messmethoden in Prüflaboren. Dabei ist jederzeit die Wichtung der ermittelten Werte zu bedenken, denn diese widersprechen sich teilweise erheblich. So verfügt ein besonders leichtes Papier nicht über die größte Festigkeit und ein gegen Feuchtigkeit imprägniertes Papier ist nur schwer oder gar nicht zu verkleben.

Papier verfügt durch den dichten physischen Verbund von Zellstofffasern und Additiven über eine kompakte, leicht zu verifizierende Bauweise. Demgegenüber steht der Aufbau der Wellpappe, die nicht in jedem Fall mit den gleichen Methoden wie Papier zu überprüfen ist. Die Struktur der Wellen erzeugt eine Vielzahl von Störfaktoren in den Messbildern, die zwar mithilfe komplexer Formeln abgebildet werden können, jedoch nie gänzlich zu verhindern sind. Daraufhin erfolgte die Entwicklung spezieller Messverfahren für die Bewertung von Wellpappe.

#### Zusammensetzung

Der grundlegende Aufbau einer Wellpappe folgt der Logik, eine Wellenbahn im Wechsel mit einer ebenen Papierlage (Sandwich) zu verkleben und diesen Verbund als Platte statisch wirken zu lassen. Sind bei den Papieren noch die unterschiedlichen Rohfasern und ihre Art der Verbindung mit Zusatzstoffen entscheidend für die Zusammensetzung des Papiers, so entsteht in einer Wellpappe ein stabiles Wirkgefüge aus räumlich veränderten Papierlagen. Wie beim Papier sind differierende Belastbarkeiten je nach Richtung der Krafteinwirkung zu verzeichnen. Das Verhältnis von Material und Hohlraum in Verbindung mit der Struktur der Elemente bestimmt über die generellen Eigenschaften und Festigkeitswerte der Wellpappe. Es wird von der Wellenform bestimmt, denn deren Gestaltung hat einen großen Einfluss auf das verbrauchte Material, die entstehenden Hohlräume und die Stabilität der Wellenlage.

#### Gesamtflächengewicht

Das strukturelle Verhältnis von Material zu Hohlraum beeinflusst das Gewicht von Wellpappe erheblich. Zusätzlich wirkt sich noch die Grammaturn der verwendeten Rohpapiere auf diesen Wert aus. Das *Gesamtflächengewicht* ergibt sich aus der Summe aller gewellten und nicht gewellten Papierlagen sowie dem eingebrachten Leim.<sup>10</sup> Weiterführend kann auch die flächenbezogene Masse der Einzellagen bestimmt werden, was bei dem Vergleich verschiedener Wellpappen von Vorteil ist.<sup>11</sup> Die Dicke der Wellpappe wird durch die Anzahl der übereinander verklebten Wellenlagen sowie deren Wellenhöhe bestimmt und kommt vor allem in der Verpackungsindustrie als wichtiger Parameter zum Tragen. Sie wird nach den Normen ISO 3034 und TAPPI T 411 ermittelt.

<sup>10</sup>Die flächenbezogene Masse wird nach DIN EN ISO 536 vom November 2012 bestimmt. [DIN12b]

<sup>11</sup>Dieser Wert wird nach DIN ISO 3039 vom Juni 2011 ermittelt. [DIN11a]

### Festigkeitswerte

Wellpappe verfügt bei einem relativ geringem Gewicht über eine sehr hohe Stabilität, deren Werte in den verschiedenen Achsen jedoch stark variieren können. Zur Bestimmung dieser Werte kommen diverse Messmethoden zum Einsatz. In Kapitel 3.2 werden verschiedene Fachartikel besprochen, welche detaillierte Forschungen zu den Festigkeitswerten von Wellpappe beschreiben. Die wichtigsten Methoden sind nachfolgend aufgeführt:<sup>12 13</sup>

- Der *Kantenstauchversuch* (ECT - Edge-Crush-Test) belastet eine Wellpappe senkrecht zu den Wellen und ermittelt den Widerstand der Wellpappe gegen Krafteinwirkung auf die Stirnseiten. Die zugehörige Norm ist die DIN EN ISO 3037 bzw. TAPPI T 811. Die Werte werden in kN/m angegeben und beschreiben vor allem die Stapelbarkeit von Boxen aus Wellpappe.
- Der *Flachstauchversuch* (FCT - Flat-Crush-Test) wird angewendet, um den Widerstand einer einseitigen und einer einwelligen Wellpappe gegenüber einer vertikal auf die Fläche wirkenden Kraft zu ermitteln. Der Versuch wird nach DIN 23035 sowie ISO 3025 und TAPPI T 825 an einem Probekörper durchgeführt und in kN/m<sup>2</sup> angegeben.<sup>14</sup>
- Der *Durchstoßversuch* ermittelt, wieviel Energie benötigt wird, um die Wellpappe mit einem in DIN 53142-1 definierten, pyramidenförmigen Körper zu durchstoßen. Die Werte werden in Joule angegeben und sind bei grobwelligen Wellpappen höher, da diese dem Durchstoßkörper einen größeren Widerstand entgegen bringen.
- Der *Biegeversuch* wird mithilfe der Balkenmethode nach DIN 53121 im Vierpunkt-Verfahren realisiert. (siehe auch Kapitel 3.2.4) Ziel ist die Bewertung von Verpackungen und Produkten aus Wellpappe, da diese häufig auf Biegung belastet werden und die Tragwirkung dennoch erhalten bleiben muss.
- Der *Berstversuch* beschreibt den Widerstand einer Wellpappe oder eines Papiers gegen einen gleichmäßigen Druck, der gegen die Fläche wirkt, bis diese zerberstet. Geprüft wird an einer kreisrunden Probe nach DIN 53141. Der Berstfestigkeitswert wird in kPa angegeben. Anzumerken ist, dass dieser Wert keine hohe Aussagekraft besitzt und eher bei den Ausgangsprodukten der Wellpappe angewendet wird. Die zugrunde liegenden Normen sind die ISO 2759 für Papier und die ISO 2759 für Pappe.

---

<sup>12</sup>Zentral-Fachausschuss Berufsbildung Druck und Medien (ZFA): Papierlexikon. [ZFA15]

<sup>13</sup>siehe auch: VDW: Basiswissen Wellpappe, 2014. [VDW14a]

<sup>14</sup>Bei zwei- und mehrwelligen Wellpappen wird dieses Verfahren nicht angewendet. Feinwellige Wellbahnen erreichen höhere Werte, da sie über eine höhere Anzahl an tragenden Wellen verfügen.

**Laufriichtung**

Wellpappe wird mithilfe von Maschinen produziert, die durch die Anordnung von Rollen über eine begrenzte Breite verfügen. Die Länge wird nur durch die Dimensionen des eingesetzten Papiers beschränkt. Die Laufriichtung gibt somit die Abmessungen der fertig produzierten Platte an und wird vor allem bei der Ermittlung der Festigkeitswerte wichtig, da diese zwischen Maschinenrichtung MD und Querrichtung CD stark variieren. In Kapitel 2.3.5 werden diese erläutert und wirken sich nicht nur auf die einzelne Wellenlage sondern auch auf die gesamte Wellpappe aus.

**Weitere Attribute**

Eigenschaften der Wellpappe, welche auf den Kontakt mit anderen Stoffen zurückzuführen sind, werden direkt von den eingesetzten Papieren bestimmt und erfahren im Zusammenhang mit Wellpappe keine besondere Betrachtung. Die Saugfähigkeit von Flüssigkeiten, die Durchlässigkeiten gegenüber verschiedenen Medien wie Licht, Luft oder Gasen und die Widerstandsfähigkeit gegen Feuer sind hier zu nennen. Bei Bedarf einer Resistenz gegenüber derartigen Einflüssen ist vor der Wellpappenproduktion das geeignete Papier zu wählen.

**2.3.2 Optische Eigenschaften**

Grundsätzlich können alle optischen Eigenschaften der Papiere, welche in Kapitel 1.4.2 erläutert werden, auch zur optischen Bewertung von Wellpappe herangezogen werden. Dabei liegt der Fokus auf den beiden sichtbaren Decklinern. Eine visuelle Bewertung von Wellpappe erfolgt vor allem im Verpackungssektor, da hier hohe Ansprüche an die Oberflächenqualität und die Bedruckbarkeit gestellt werden. Während die Struktur der Wellpappe den Schutz des verpackten Gutes sicherstellt, dient die äußere Papierbahn der Außenwirkung. Diese wird entweder ganzflächig bedruckt oder mit einer bereits bedruckten PE-Folie überzogen, was durch den Glanz und die Präzision der Oberfläche zu einer hochwertigen Erscheinung führt. Zur weiteren Aufwertung werden Wellpappen mit anderen Stoffen wie geprägtem Leder oder Textilien überzogen. Verpackungen mit einem geringen Gestaltungsanspruch werden nur teilweise bedruckt und zeigen die bräunlich-beige Farbe des Decklinerpapiers. Der gestiegene Anspruch an ökologische Produktionsformen und der Einsparung von Ressourcen macht auch vor Verpackungen nicht halt. Dadurch erfahren unbehandelte und unbedruckte Wellpappen einen Auftrieb, denn sie transportieren die Botschaft des nachhaltigen und recycelten Produktes.

**2.3.3 Haptische Eigenschaften**

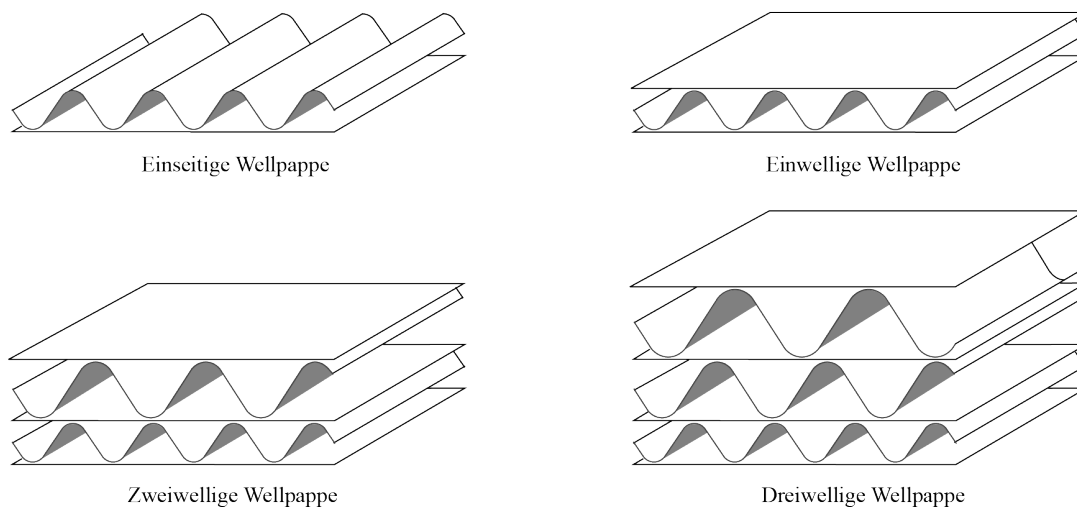
Da Wellpappe und daraus hergestellte Produkte sehr häufig von Menschen berührt, bewegt und verwendet werden, gehören die haptischen Eigenschaften zu wichtigen subjektiven Bewertungskriterien. Die unmittelbar fühlbaren Charakteristika der Oberfläche der Wellpappe sind auf die haptischen Merkmale der verwendeten Papiersorten zurückzuführen. Die in Kapitel 1.4 erläuterten Attribute können daher bei einer Bewertung der Wellpappe herangezogen werden. Die Festigkeit gegenüber der Druckbelastung per Hand kann durch einfaches eindrücken beurteilt werden. Dabei werden die innen liegenden Wellenbahnen zusammengepresst.

Die Stärke der Verformung hängt neben dem Pressdruck der Hand von der Höhe der Wellenbahn ( $\uparrow$  Wellenhöhe =  $\downarrow$  Belastbarkeit) und der Stabilität des Deckliners ( $\uparrow$  Papierstärke =  $\downarrow$  Verformungsbereich) ab. Die Kantenbeschaffenheit der Deckliner trägt zur verletzungsfreien Greifbarkeit bei. Ist diese nicht gegeben, sind die Kanten entweder zu falten oder mit einem Kaschiermaterial zu umleimen.

Der Einsatz von Wellpappe als architektonisches Bauteil macht eine Überprüfung der Wellpappe nach haptischen Merkmalen notwendig, da an der Schnittstelle zwischen Nutzer und Bauteil nicht nur sicherheitsrelevante Aspekte sondern auch das allgemeine Wohlbefinden der Menschen zu berücksichtigen ist. Zu hinterfragen ist dabei, ob der Nutzer das Bauteil berühren und mit ihm interagieren wird oder ob es beispielsweise als lastführendes Tragelement unter einer Deckenplatte außerhalb des Einflussbereiches von Personen liegt.

### 2.3.4 Wellenarten

Laut DIN 6735 der Ausgabe vom Februar 2010 ist Wellpappe eine “Pappe aus einer oder mehreren Lagen eines gewellten Papiers, das auf eine Lage oder zwischen mehreren Lagen eines anderen Papiers oder Pappe geklebt ist.”<sup>15</sup> DIN 6730 vom Februar 2011 geht genauer auf die Unterschiede ein und definiert die vier Arten der *einseitigen*, *einwelligen*, *zweiwelligen* und *dreiwelligen Wellpappen*. Abbildung 2.1 zeigt die Unterschiede auf.<sup>16</sup>



**Abbildung 2.1:** Wellpappen-Arten

<sup>15</sup>DIN 6735: Papier, Pappe und Faserstoffe - Übersicht von Begriffen, Februar 2010, S. 29. [DIN10]

<sup>16</sup>Nachzeichnung aus: VDW: Basiswissen Wellpappe, 2014. [VDW14a]

## 1. Einseitige Wellpappe

Wellpappe, “bestehend aus einer Lage gewellten Papiers, das auf Papier oder Pappe geklebt ist, (handelsüblich in Rollenform, als Rollenwellpappe bekannt).”<sup>17</sup> Das Material (engl.: *single faced corrugated fibreboard*) kann noch gerollt werden und wird hauptsächlich als Schutzmaterial eingesetzt. Es stellt den ersten Entwicklungsschritt von der einfachen Wellenbahn zur Wellpappe mit Decklinern dar.

## 2. Einwellige Wellpappe

“Wellpappe, bestehend aus einer Lage gewellten Papiers, das zwischen 2 Lagen Papier oder Karton geklebt ist”.<sup>18</sup> Diese Wellpappe (engl.: *single wall corrugated fibreboard*) kann nicht mehr gerollt werden und markiert den eigentlichen Beginn der Wellpappen-Arten. Sie wird hauptsächlich bei einfachen Verpackungen und Kartonagen eingesetzt.

## 3. Zweiwellige Wellpappe

“Wellpappe, bestehend aus 2 Lagen gewellten Papiers, die durch eine Lage Papier oder Pappe miteinander verklebt und deren freie Außenflächen ebenfalls mit je einer Lage Papier oder Karton beklebt sind”.<sup>19</sup> Die DIN 6730:2011-02 spricht hier fälschlicherweise von “zweiseitiger” Wellpappe.<sup>20</sup> Bei dieser Wellpappe (engl.: *double-double face corrugated fibreboard*) werden unterschiedlichen Wellentypen miteinander kombiniert. Eine grobe Welle erhöht dabei den mechanischen Schutz nach innen und eine feine Welle verbessert das Druckergebnis außen, was vor allem bei Produktverpackungen wichtig ist.

## 4. Dreiwellige Wellpappe

“Wellpappe, bestehend aus 3 Lagen gewellten Papiers, die durch 2 Lagen Papier oder Karton miteinander verklebt sind, und deren Außenflächen ebenfalls mit je einer Lage Papier oder Karton beklebt sind”.<sup>21</sup> Diese Wellpappe (engl.: *triple wall corrugated fibre board*) versucht die jeweiligen Eigenschaften der Wellen zu nutzen und vereint sehr große, mittlere und kleine Wellen miteinander.

Der oben beschriebenen Logik folgend, können Platten die aus mehr als drei Lagen aufgebaut sind, nach der Anzahl ihrer Wellen bezeichnet werden. Sie finden ihre Anwendung häufig als Kerne in Sandwich-Elementen. Die englischen Bezeichnungen definieren hierbei nicht die Welle im eigentlichen Sinn sondern bestimmen entweder die Anzahl der äußeren Ansichten wie z.B. *double face corrugated fibreboard* oder die Anzahl der eine Welle umgebenden Schichten wie z.B. *double wall corrugated fibreboard*.

<sup>17</sup>DIN 6730: Papier und Pappe - Begriffe, Februar 2011, S. 20. [DIN11b]

<sup>18</sup>ebenda. S.20 [DIN11b]

<sup>19</sup>ebenda. S.57 [DIN11b]

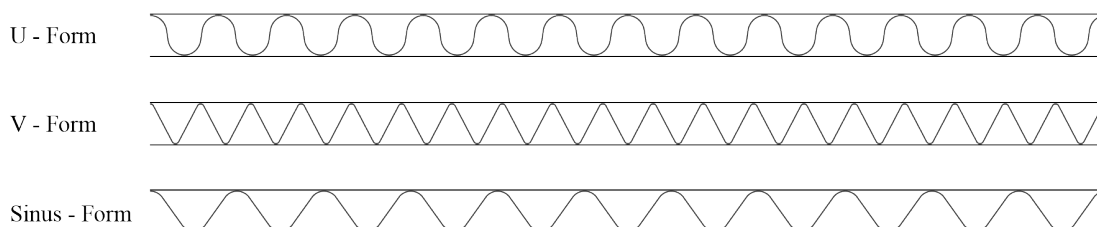
<sup>20</sup>Dies ist vermutlich auf die englische Bezeichnung *double-double face corrugated fibreboard* zurückzuführen. Richtigerweise heißt es aber “zweiwellige Wellpappe”. In sämtlich Publikationen zum Thema ist aber der Begriff der “zweiwelligen Wellpappe” definiert und wird daher auch in dieser Arbeit Anwendung finden. Eine E-Mail-Korrespondenz mit dem Institut für Normung vom 10.09.2013 bestätigte den inhaltlichen Fehler. Eine Überarbeitung in der nächsten Revision dieser Norm wird erfolgen.

<sup>21</sup>DIN 6730: Papier und Pappe - Begriffe, Februar 2011, S. 17 [DIN11b]

Für die Produktion von Wellpappe mit mehreren Schichten müssen nicht zwangsweise die Wellenprofile desselben Typs addiert werden. Häufig werden unterschiedliche Typen bewusst kombiniert, um ihre Einzelvorteile nutzen zu können. In der Verpackungspraxis haben sich Kombinationen aus Grob- oder Mittelwelle mit Feinwelle bewährt. Die größeren Wellen dienen hierbei der Polsterung der Ware. Die kleineren Wellen stabilisieren diese durch ihre Steifigkeit und schützen die Verpackung nach Außen. Die industriell gebräuchlichsten Kombinationen sind *BC-Wellen* und *EB-Wellen*, welche in Kapitel 2.3.6 näher erläutert werden.

### 2.3.5 Wellenformen

Die Wellen zwischen zwei Papierlagen werden auch als *Rillen* oder *Riffeln* bezeichnet. Sie geben der gesamten Wellpappe eine strukturelle Erscheinung vor und entstehen, wenn im so genannten Wellenaggregat der Maschine eine Papierbahn durch zwei gegenläufige Walzen geführt wird, die über ein Wellen- oder Riffelmuster verfügen und dieses in die Papierbahn prägen. Sie können als U-Form oder V-Form oder aus einer Kombination aus beiden Formen gebildet sein. Abbildung 2.2 verdeutlicht diese Unterschiede.<sup>22</sup>



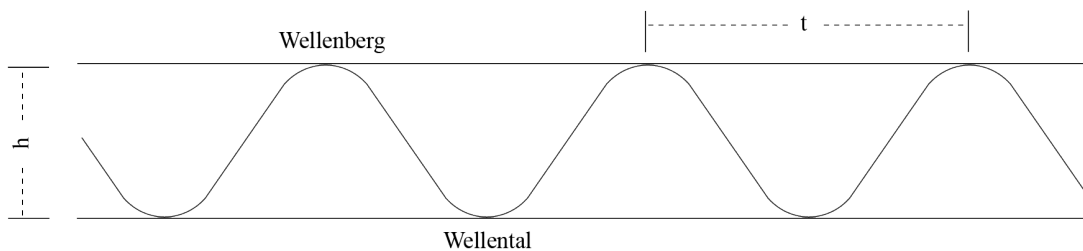
**Abbildung 2.2:** Wellenformen

Industrieseitig wurden zunächst Wellen hergestellt, die eine U-Form besaßen. Sie wird erzeugt, wenn die Rillen der Walzen gänzlich abgerundet sind. Die U-Wellen weisen eine hohe Elastizität aber nur eine geringe Druckfestigkeit auf. Diese Eigenschaft wird vor allem bei einseitigen Wellpappen genutzt, deren Hauptaufgabe die Polsterung eines Produktes ist, da die elastischen Wellen alle Stöße abfedern. Weitere Entwicklungen führten zur V-Welle, die äußeren Druckeinwirkungen wesentlich besser widerstehen, jedoch über eine verminderte Elastizität verfügt. Die Produktionswalze wird hierfür mit scharfen, dreieckigen Rillen ausgestattet, was zu zackenförmigen Rillen ohne Abrundung führt. Ihr Nachteil besteht darin, dass die Druckfestigkeit nach Überschreitung eines fixen Grenzwertes rapide nachlässt und eine Quetschung des Bauteils erfolgt. Die Kombination der Vorteile beider Wellenformen führte zur Entwicklung der UV-Welle. Sie wird auch als *Sinuswelle* bezeichnet und wird in Deutschland hauptsächlich produziert.

<sup>22</sup>Wang, D.: Cushioning Properties of Multi-layer Corrugated Sandwich Structures, S. 59. [Wan09]



Die Punkte, an denen die kurvige Wellenlinie die über ihr liegende Deckenbahn berührt, werden als Wellenberge bezeichnet. Ihr Pendant auf der Unterseite heißt Wellental. Der vertikale Abstand zwischen unterer und oberer Deckenlage wird mit Wellenhöhe ( $h$ ) oder Amplitude bezeichnet. (siehe Abb. 2.3) Die Abstände sind immer gleich, sonst würde die Wellpappe über unterschiedliche Stärken in einer Platte verfügen. Der jeweilige Abstand zwischen den Wellenbergen oder -tälern heißt Wellenteilung ( $t$ ). Auch seine Dimension ändert sich nicht, da sonst Verformungen im Längsverlauf der Platte entstehen würden. Wellenhöhe und Wellentiefe stehen in einem proportionalem Verhältnis von etwa 1:2 zueinander. Wird nun die Plattenstärke einer Wellpappe erhöht, vergrößert sich die Wellenhöhe und mit ihr die Wellentiefe im gleichen Verhältnis.



**Abbildung 2.3:** Attribute der Sinus-Wellenformen

### 2.3.6 Wellenprofile

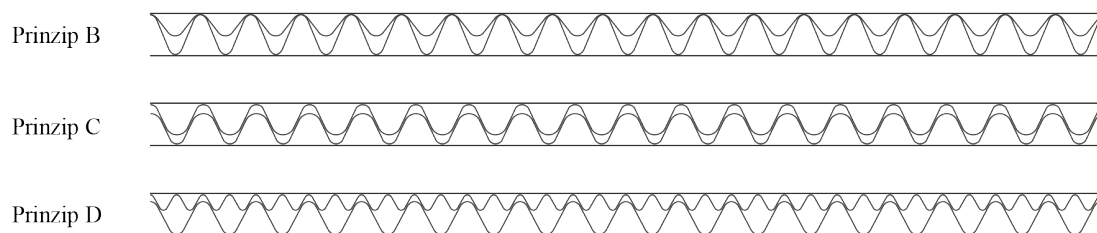
Die DIN 55468-1:2004-08 nimmt eine Definition der genormten Wellenprofile vor und veranschaulicht ihre Größenbeziehungen. Laut dem Verband der Wellpappen-Industrie sind die angegebenen Bezeichnungen allgemein gebräuchliche Definitionen der Wellpappe-Produzenten.<sup>23</sup> Die gebräuchlichsten Wellenprofile sind in DIN 55468-1 vom August 2008 geregelt. Die Wellenhöhen und -teilungen sind in Bereiche zusammengefasst und werden mit Großbuchstaben gekennzeichnet. Das Wellenprofil der *A-Welle* spielt in der heutigen Produktion keine bedeutende Rolle mehr. Sie wurde von der *C-Welle* weitestgehend abgelöst, die über eine etwas geringere Höhe verfügt. Parallel dazu wurde die *B-Welle* entwickelt. Diese lässt sich wegen der geringeren Wellenteilung wesentlich besser bedrucken und spielt eine große Rolle im Bereich der Werbung. Sie wird als zweiwellige Pappe in Kombination mit der *C-Welle* vor allem im Verpackungsbereich eingesetzt. Es folgt die *E-Welle*, die eine nochmals bessere Bedruckbarkeit aufweist vor allem zur hochwertigen Verpackung verwendet wird.

Neben diesen Wellenprofilen haben sich weitere Typen etabliert, welche die oberen und unteren Amplitudenbereiche erweitern. Gleichzeitig haben sich Begriffe herausgebildet, die von Herstellern wie auch Autoren gleichermaßen angewendet werden, obwohl diese nicht in der DIN festgeschrieben sind. Eine weitere Möglichkeit in der Einordnung dieser Wellenprofile besteht in der Angabe der Wellen pro Meter.

<sup>23</sup>vgl. VDW: Basiswissen Wellpappe, S. 37-40. [VDW14a]

Die Grafikwelle G wurde industrieseitig um zwei weitere, geringfügig abweichende Wellenarten O und N ergänzt. Deren Abmessungen sind noch nicht in die DIN aufgenommen, werden aber von den produzierenden Unternehmen als Quasi-Standard verwendet. Die Tabelle 4.1 auf Seite 203 führt die Bezeichnungen der Wellen mit den Spannen der Profile, ihren Wellenteilungen und den dazugehörigen Wellenhöhen auf. Die industrieseitig angebotenen Profiltypen und -kombinationen werden ständig erweitert und den Anforderungen der Kunden angepasst. Dadurch sind viele weitere Zwischenformen entstanden, die in noch keiner Norm erfasst sind und trotzdem eine sehr weite Verbreitung erfahren. Die Wellentypen können hierbei nicht nur einzeln in Lagen mit einem dazwischen liegenden Deckliner verarbeitet werden sondern beispielsweise auch doppelt, um die innere Steifigkeit signifikant zu erhöhen.

Eine interessante Entwicklung auf diesem Gebiet stellt eine mehrlagige Wellpappe dar, bei der zwei unterschiedliche Wellenprofile kombiniert zwischen zwei Decklagen geklebt werden. In der europäischen Patentschrift *EP0765216B1* wird dieses Prinzip an fünf Beispielen erläutert. Neben einem Vorschlag für die doppelte Applikation von U-Wellen zeigt der Erfinder Do Wook Kim die Variation verschieden hoher Sinus-Wellen sowie die versetzte Anordnung zweier gleich hoher Wellen. Abbildung 2.4 zeigt einen nachgezeichneten Auszug aus der Patentschrift und verdeutlicht die Prinzipien B, C und D.<sup>24</sup> Durch Variation der Wellentiefe und -höhe entsteht eine äußerst robuste Wellpappe. Sie fängt Stöße von Außen ab, polstert gleichzeitig nach innen und erreicht dies ohne einen mehrlagigen Aufbau mit Zwischenlinern.



**Abbildung 2.4:** Kombination verschiedener Wellenprofile zwischen zwei Decklagen

Die im Patent vorgeschlagene Kombination unterschiedlich großer Wellenlagen können als Weiterentwicklung der *doppelt einwelligen Wellpappe* angesehen werden. Sie verfügt über zwei gleichförmige, direkt miteinander verklebten Wellenbahnen zwischen den Decklinern. Dabei sollen die erhöhten Festigkeitswerte dieser doppelten Welle genutzt werden. Da der technische Produktionsaufwand nicht im Verhältnis zum Nutzen stand, konnte sich diese Art nicht etablieren, denn ebenbürtige Ergebnisse wurden auch mit verstärkten einlagigen Wellen erreicht.

<sup>24</sup>Kim, D.W.: EP0 765 216 B1: Production of multi-ply corrugated Paperboard, 1998. [Kim98]

### 2.3.7 Wellenrichtungen

In den Betrachtungen zur Wellpappe wird wie auch bei der einzeln produzierten Papierlage zwischen Längsrichtung (engl.: *machine direction*: MD) und Querrichtung (engl.: *cross direction*: CD) unterschieden. Wird die Wellpappe in Längsrichtung geschnitten, ist die regelmäßig verlaufende Wellenform eindeutig zu erkennen. Die Breite und Länge der Wellenbahn ist dabei von den Dimensionen des Rohpapiers abhängig. Zunächst werden sehr lange Wellenbahnen produziert, die sich nach der Länge der Bahn Rohpapier richten. Nach Auflage der Deckpapiere erfolgt anschließend ein Beschnitt der Wellpappe in die gewünschte Form. Abbildung 2.5 macht die Unterschiede deutlich.

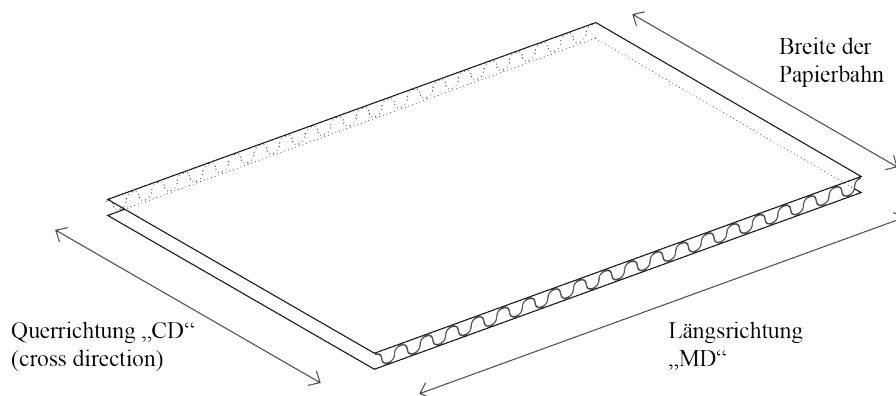


Abbildung 2.5: Wellenrichtung MD und CD

Die Wellenrichtung einer Wellpappe hat einen direkten Einfluss auf die statischen Kenngrößen. In Querrichtung verfügt die Platte über eine wesentlich größere Biegesteifigkeit als in Maschinenrichtung, wo die besondere Struktur von Wellbergen und -tälern ein Versagen begünstigt. Dies ist beim Einsatz der Elemente zu beachten.

### 2.3.8 Verbindung der Papierlagen

Papierwerkstoffe gehören zu den wenigen Produkten, welche lediglich mit einer Verklebung sicher und kraftschlüssig zu fügen sind. Dabei stehen sehr viele verschiedene Klebstoffe zur Verfügung. Mit Ausnahme von temporär wirkenden Haftmitteln sind die Verbindungen irreversibel. Zu unterscheiden sind wasserfeste und wasserlösliche Klebstoffe. Dies ist im vorliegenden Kontext jedoch nicht zielführend, da Wasserkontakt nicht nur die Klebestelle an sich beeinträchtigt oder zerstört sondern einen direkten Einfluss auf die Papierstruktur ausübt.

Die dauerhafte Verbindung der Wellenbahnen mit den Decklagen erfolgt mit Stärkeleim, der seine Klebekraft unter Hitzeeinwirkung entfaltet.<sup>25</sup> Anschließend wird auf der gegenüberliegenden Seite die zweite Deckenbahn geklebt. Bei Bedarf wird nun auf eine der beiden äußeren Lagen eine weitere Wellenbahn geklebt. Nach diesem Arbeitsprinzip entstehen in einer Maschinenstrecke mehrlagige Wellpappen. Der Auftrag des Klebstoffs ist exakt zu dosieren. Wird zu wenig Material aufgetragen, entsteht eine minderwertige und weniger belastbare Verbindung zwischen Welle und Deckpapier. Zu viel Leimauftrag bewirkt eine zu starke Durchfeuchtung und führt ebenso zur Schwächung der Wellpappe. Der Stärkeleim wird ausschließlich auf den Wellenbergen und -tälern aufgebracht und muss mindestens 80% der sich berührenden Papierflächen bedecken. Je nach Beschaffenheit der Papiere und Anforderungen an die Wellpappe werden 16 – 40g/m<sup>2</sup> Wellpappe aufgebracht. Nach Trocknung der flüssigen Leimanteile verbleiben 4 – 10g/m<sup>2</sup> Leim zwischen den Papierlagen.

Eine vermeintliche Effizienzsteigerung bei der Wellpappenproduktion versprechen Ultraschallverfahren, mit denen theoretisch gänzlich auf Klebstoffe verzichtet werden könnte. Hierbei kommen so genannte *Cold Corrugator* zum Einsatz, welche die Papierlagen mittels Hochfrequenz verbinden. Basierend auf dem Paper *Use of Ultrasonic Welding for production of single-faced corrugated board* von Norbert Staedele und Claus Schlieckmann untersucht Tony Pilkington in seiner Arbeit *The Cold Corrugator* die Wirkungsweise dieses Verfahrens. Er kommt zu dem Ergebnis, dass die derzeitigen technischen Möglichkeiten nur eine unzureichende Verbindungsqualität erreichen und führt aus:

“The system achieved bonding but the restrictions on paper selection and running speed, the high cost of maintaining or replacing titanium sonotrodes, the requirement to continue applying moisture and heat to the medium - all coupled with the inability to apply the same principles to the double facer bond - clearly render ultrasonics unsuited to this application.”

Pinnington kommt somit zum Ergebnis, dass der Einsatz von Hochfrequenzverschweißung nicht geeignet ist, um die herkömmlich Verklebung der Papierlagen gänzlich zu ersetzen. Abschließend bemerkt er aber, dass diese Methode trotzdem in bestimmten Nischenprodukten zum Einsatz kommen könnte. Denkbar sind hier die Anwendung in Bereichen, wo ein erhöhter Anspruch an die absolute Recyclingfähigkeit der Wellpappe gelegt wird, da kein Leim in das Material eingebracht wird.<sup>26</sup>

---

<sup>25</sup>Der Stärkeleim wird aus Mais, Weizen und seltener aus Kartoffeln oder Erbsen gewonnen.

<sup>26</sup>Pinnington, T.: *The Cold Corrugator*, in: *The Corrugator*, S. 6. [Pin08]

## 2.4 Produktion

Wellpappe ist den Papieren zuzuordnen, da sie ein Gebilde aus räumlich verformten Papierlagen und Klebstoff darstellt. Der grundlegende Aufbau aus gewellten und ebenen Papieren ist immer gleich und variiert nur in den Dimensionen der gewellten Bahnen. Die Stabilität des Gebildes hängt stark von den eingesetzten Papieren, der Form der Wellen, ihrer Dimensionierung und des eingesetzten Klebstoffes ab. Ein großer Vorteil bei der Produktion stellt der hohe Anteil an Recyclingpapieren dar. Im Jahr 2012 lag ihr Anteil an der Gesamtproduktion in Deutschland für Deck- und Wellenpapiere bei ca. 38% und steigt weiter an.<sup>27</sup>

### 2.4.1 Grundlagen und Rohstoffe der Wellpappenproduktion

Zur Produktion von Wellpappe können je nach Anforderung des späteren Endproduktes unterschiedliche Rohpapiere zum Einsatz kommen. Den größten Anteil machen vollständig recycelte Papiere aus, denen kein Anteil an Frischfasern mehr zugefügt wird. Da recycelte Papiere wegen der im Wiederaufbereitungsprozess verkürzten Fasern über geringere Festigkeitswerte verfügen, werden je nach Anforderung Frischfasern hinzugegeben. Es erfolgt eine Unterscheidung zwischen nicht gewellten Papieren der Decklagen und den gewellten Papieren der Zwischenlagen. Das Papier der nicht gewellten Außen- und Zwischenlagen wird als *Deckliner*, *Decklage* oder *Deckenbahn* bezeichnet. Es besteht einerseits aus *Kraftpapieren* oder *Testlinerpapieren* bzw. in seltenen Fällen aus *Schrenzpapieren*.

- Kraftlinerpapier wird aus Nadelhölzern und einem Anteil Recyclingpapier (>30%) gewonnen und gibt der Wellpappe ihre charakteristische braun-gelbe Farbe. Durch den höheren Anteil an langen Frischfasern ist es äußerst widerstandsfähig und kommt zum Einsatz, da die außen liegenden Papiere einem höheren Anspruch an Festigkeit, Steifigkeit, Optik, Haptik, und Resistenz gegenüber von Einflüssen wie Feuchtigkeit oder Druck genügen müssen. Die deutschen Produktionsbetriebe verarbeiten Kraftliner mit Grammaturen von 100g/m<sup>2</sup> bis 440g/m<sup>2</sup> und sind in der Lage, sehr robuste Wellpappen zu erzeugen.
- Der Begriff Testliner wird für Deckenbahnen verwendet, deren Festigkeitseigenschaften nachgewiesen wurden. Sie bestehen zu 100% aus recyceltem Altpapier und verfügen dank der immer leistungsfähigeren Produktionsprozesse über ähnliche Eigenschaften wie das Kraftlinerpapier. Lediglich die Berstfähigkeit fällt geringer aus und wird durch stärkere Papierlagen ausgeglichen. Im Regelfall liegt ihre Grammaturn im Bereich von 120g/m<sup>2</sup> bis 320g/m<sup>2</sup>.
- Seltener wird Schrenzpapier als Deckenpapier eingesetzt (<5%), da es aus gemischtem Altpapier hergestellt wird und mit einer Grammaturn von 100g/m<sup>2</sup> bis 140g/m<sup>2</sup> über verminderte Festigkeitseigenschaften gegenüber Kraft- oder Testlinerpapier verfügt. Haupteinsatzgebiet sind die Zwischenlagen bei mehrwelligen Pappen.

<sup>27</sup>VDW: Zahlen und Fakten 2014, Broschüre. [VDW14b]

Das gewellte Papier zwischen den Decklagen wird aus hochwertigen recycelten Altpapieren und einem Anteil Halbzellstoff hergestellt, der mittels eines chemischen Verfahrens aus Holzschnitzeln gewonnen wird. Der hohe Anteil von Lignin macht den Halbzellstoff sehr steif und verleiht der Wellpappenplatte ihre Stabilität. Wellenpapier werden im Endlosverfahren direkt aus einer Rolle Rohpapier erzeugt.

### 2.4.2 Produktionsablauf

Zur Produktion von Wellpappe kommen mehrere Maschinen zum Einsatz, die in einem bis zu 120 Meter langen Verbund hintereinander zusammengeschaltet sein können. Moderne Maschinen weisen eine Arbeitsbreite von bis zu 3,35 Metern auf und können im Endlosverfahren maximal 80.000 m<sup>2</sup> pro Stunde verarbeiten.<sup>28</sup> Eine Wellpappenanlage gliedert sich in ein *Wet End* und ein *Dry End*. Im ersten Teil erfolgt die Formung und Verklebung der Papierlagen. Im zweiten Teil wird die Wellpappe auf Format geschnitten und gestapelt. Anschließend erfolgt die Weiterverarbeitung und die Auslieferung an den Kunden.

#### Wet End

Der erste Teil einer Wellpappenanlage setzt sich aus mehreren Abschnitten zusammen. Zunächst erfolgt die Zuführung des Rohpapiers, welches im *Abroller* der Haltevorrichtung für die tonnenschweren Papierrollen, eingehängt ist. Das Papier wird im *Anfeuchter* mit Dampf befeuchtet und durch den *Single Facer* (einseitige Maschine) geführt. Hier entsteht mithilfe zweier auf 200°C beheizter Walzen mit Riffelmuster der Wellenstoff. Die Wellenberge der auf 85°C erwärmten Wellenbahn werden im Leimwerk mit Klebstoff versetzt und unter dem Druck einer Anpresswalze mit einer weiteren Papierbahn zusammengeführt.

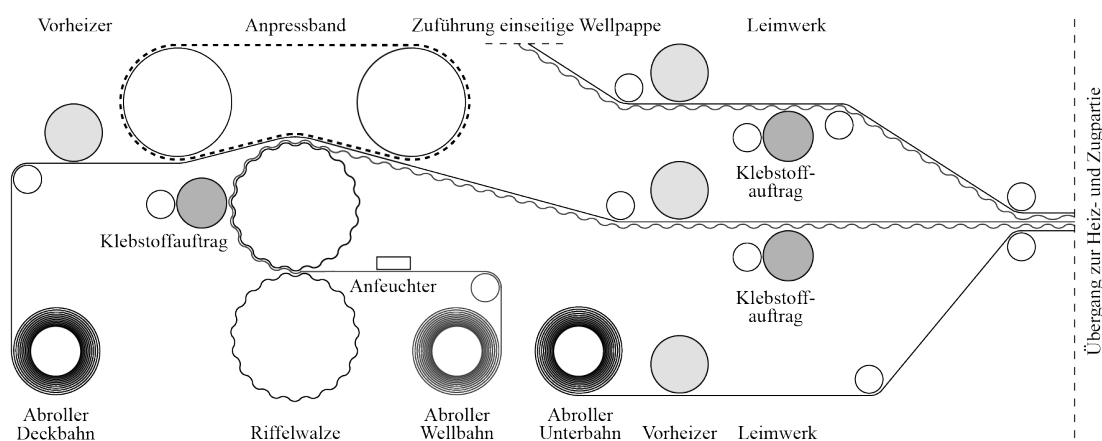


Abbildung 2.6: Single Facer und Leimwerk der Wellpappenmaschine

<sup>28</sup>Blebschmidt, J. (Hrsg.): Papierverarbeitungstechnik, S. 318. [Ble13]

In modernen einseitigen Maschinen werden die beiden Papierbahnen mithilfe eines Anpressbandes miteinander verklebt. Hierbei werden Vibrationen sowie Beschädigungen an der Wellenbahn vermieden und die typischen Abdrücke der Riffelwalzen treten nicht mehr auf. Im nächsten Arbeitsschritt werden mehrere einseitige Wellpappen zusammengeführt, um eine mehrwellige Wellpappe zu produzieren. Hierbei werden häufig unterschiedliche Wellenprofile kombiniert. Über ein System aus Umlenkwalzen mit angeschlossenen Vorheizern werden die einseitigen Wellpappen übereinander geführt und in einem Leimwerk mit Klebstoff versehen. Abbildung 2.6 zeigt den schematischen Aufbau des Wet End. Im Anschluss an das Leimwerk passiert die Wellpappe den Einlauf der Heiz- und Zugpartie, wo der erste Kontakt der einzelnen Wellpappen stattfindet. Dort wird der Wellpappenverbund verpresst. Die mehrwellige Wellpappe wird hierfür unter einem fortlaufenden Band transportiert und unter einem niedrigen Druck zusammengepresst, da sonst die Wellenberge zerstört würden. Unter Hitzeeinwirkung geliert der Klebstoff und verbindet Wellenberge und Papierlage dauerhaft. Abbildung 2.7 zeigt den schematischen Aufbau der Heiz- und Zugpartie.<sup>29</sup>

### Dry End

Der zweite Teil einer Wellpappenanlage wird als *Dry End* bezeichnet, da die befeuchteten Wellpapiere im Produktionsprozess nach und nach abgetrocknet werden. Hier erfolgt die Konfektionierung der fertigen Wellpappen sowie die eventuelle Weiterverarbeitung. Zunächst wird die vom Wet End übergebene Wellpappenbahn mit dem *Kurzquerschneider* von schlecht verklebten Abschnitten und Fehlern befreit.

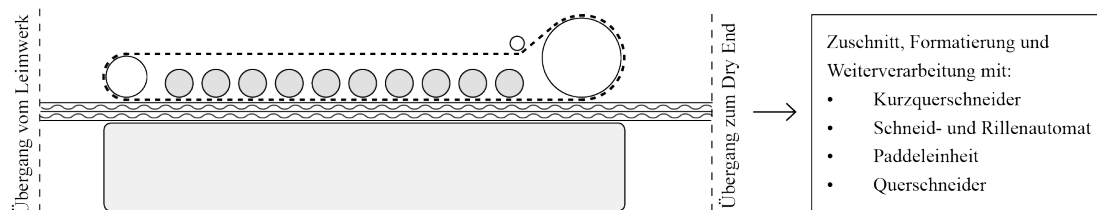


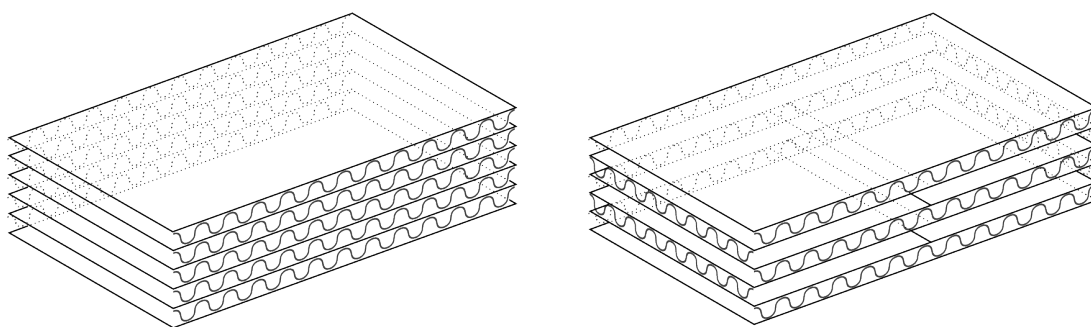
Abbildung 2.7: Heiz- und Zugpartie der Wellpappenmaschine

Anschließend erfolgt der Zuschnitt von Wellpappen-Platten nach Kundenwunsch. Ein *Schneid- und Rillautomat* schneidet die Kanten sauber zu und prägt ggf. Rillen in die Wellpappe. Je nach Rillmuster können danach Schachteln, Aufsteller oder andere Faltobjekte erzeugt werden. Die nachfolgende Paddeleinheit sortiert die einzelnen Platten computergesteuert und führt diese den passenden Schneidewerkzeugen wie dem Querschneider zu. Dies ermöglicht die exakte und plangetreue Produktion von Wellpappen in allen erdenklichen Formaten. Abschließend sammeln sich die zugeschnittenen Platten in der Ablage und werden auf den Weitertransport vorbereitet.

<sup>29</sup>Abbildungen nachgezeichnet aus: Blechschmidt, J. (Hrsg.): Papierverarbeitungstechnik, S. 320f. [Ble13]

## 2.5 Produkte

Wellpappe und daraus hergestellte Produkte bieten durch Faltung und Bedruckung aber auch durch das leichte Recycling eine enorme Anwendungsvielfalt. Die Industrie ist in der Lage, die in Kapitel 2.3.6 vorgestellten Wellenprofile für jedes Nutzungsszenario zu kombinieren und immer weiter zu optimieren. Obwohl sich die verwendeten Materialien wie auch die kombinatorische Vorgehensweise bei der Wellpappenproduktion immer weiter entwickelten, hat sich der grundlegende Aufbau horizontal geschichteter, in ihrer Höhe teilweise differierender Wellenlagen nicht verändert. Auch der regelmäßige Wechsel zwischen Wellenbahn und ebener Papierlage blieb als Konstruktionsmerkmal erhalten. Im Bereich der Verpackung von Konsumgütern stellt diese Art der Anwendung die optimale Kombination aus reduziertem Materialeinsatz bei gleichzeitig hocheffizientem Leistungsspektrum dar. Stetige Verbesserungen sind auf diesem Feld nur noch bei der Reduzierung der Ausgangsstoffe, deren energiesparender Produktionsweise sowie der umweltschonenden Rückführung der eingesetzten Materialien in den Stoffkreislauf zu vermelden.



**Abbildung 2.8:** Deckungsgleiche und rechtwinklig versetzte Anordnung der Wellpappe

Mehrschichtige Platten weisen gegenüber Wellpappen aus nur einer oder zwei Wellenlagen eine wesentlich höhere Stabilität auf. Trotzdem bleiben diese durch die deckungsgleiche Addition der Wellen in Längsrichtung immer noch wesentlich anfälliger gegen Umknicken als in Querrichtung. Die quer verlaufenden Wellentäler bieten zusammen weniger Widerstand gegen Knicken und bedingen sogar ein Weiterknicken nach einer anfänglichen Krafteinleitung und der damit einhergehende Schwächung der oberen Wellenlage. Da im Verpackungsbereich das Umknicken und damit Falten einer Wellpappe unabdingbar ist, werden industrieseitig bereits *Soll-Knick-Rillen* in die Wellpappe eingepresst, um das kontrollierte Umknicken zu gewährleisten. Trotzdem können in bestimmten Bereichen höhere Stabilitäten als jene der mehrschichtigen, deckungsgleichen Wellpappen erforderlich werden, was zur Entwicklung der um 90° versetzten Wellpappe führte. Dieses System nutzt die stabilere Längsrichtung der Welle und verdreht diese im rechten Winkel gegen die Nachbarwelle. Analog zum Brettsper Holz werden somit die stärkeren Richtungen immer im Wechsel versetzt und führen zu signifikanten Stabilitätsverbesserungen. Abbildung 2.8 verdeutlicht die Unterschiede.



Im Gegensatz zur deckungsgleichen Verarbeitung arbeitet hier die zweite Wellenlage gegen einen anfänglichen Knick in der äußeren Schicht und verhindert somit das weitere Knicken. Die maschinelle Verarbeitung dieser Platten ist aufwändiger, da die Wellen nicht in Maschinenrichtung aufeinander appliziert werden können, sondern immer eine segmentierte Addition von quer zur Längsrichtung verleimten Einzellagen benötigt. Diese Wellpappen-Platten konnten sich nicht großflächig durchsetzen, da ihre Vorteile gegenüber den deckungsgleichen Platten die Nachteile der aufwändigeren Fertigung nicht ausgleichen konnten. Die nachfolgend beschriebenen Wabenplatten aus Wellpappe machen sich den Vorteil der gleichen Maschinenrichtung wieder zu Nutze und liefern neben einer nochmals gesteigerten Stabilität eine glattere Oberfläche, da die äußeren Deckpapiere nicht mehr auf Wellenberge appliziert werden müssen.

### 2.5.1 Sandwichstrukturen

Der Übergang von mehrschichtig verklebten Wellpappen zu so genannten Sandwichpaneelen ist fließend und wird durch diverse Entwicklungen durch den Einsatz unterschiedlichster Materialien flankiert. Abgrenzend soll hier deshalb kurz auf Sandwichpaneele und ihre Eigenschaften eingegangen werden, bevor sich der Fokus auf die Wabenplatten aus Wellpappe richtet. Werden Sandwichstrukturen betrachtet, können das *Vollsandwich*, das *Hautsandwich* und die *Profilversteifung* (versteifte Schalenbauweise) unterschieden werden.<sup>30</sup> Da sich diese Arbeit mit Wabenplatten aus Wellpappe beschäftigt, werden hier die Vollsandwichplatten näher beleuchtet. Bauteile mit einer Hautsandwich- oder profilversteifenden Konstruktion bieten gegenüber dem Vollsandwich zwar Gewichtsvorteile, sind in der gestalterischen Anwendbarkeit schwieriger zu handhaben, da ihre Form explizit für einen gebundenen Zweck entwickelt werden muss. Volle Sandwichpaneele bestehen aus einem inneren Kern, der sehr unterschiedlich aufgebaut sein kann und außen applizierten Deckschichten, welche für die Kraftweiterleitung verantwortlich sind. Grundlegend können die zwei verschiedenen Systeme der *Integralbauweise* und der *Differentialbauweise* unterschieden werden.

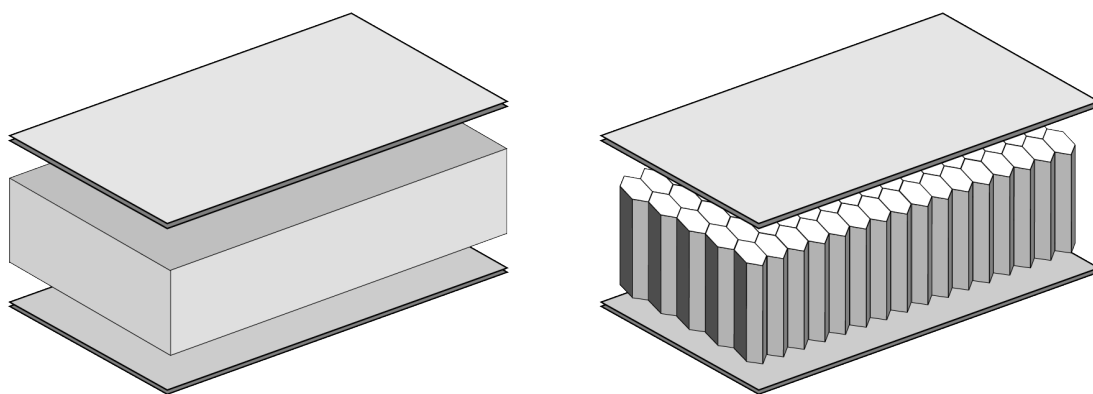
#### Differenzierung von Integralbauweise und Differentialbauweise

Der Wunsch, den Materialeinsatz und Fertigungsaufwand einer Sandwichplatte auf ein Minimum zu reduzieren, führt zur Integralbauweise. Hier kommen aufgeschäumte Kerne zum Einsatz, die durch ihre homogene Struktur über isotrope Eigenschaften verfügen. (siehe Abbildung 2.9 links) Am häufigsten kommen polymere Schaumstoffe wie PU- oder EPS-Schäume zur Anwendung, da sie effizient produziert werden können.<sup>31</sup> Trotz der einfacheren Bauweise sind die Schaumkerne nicht in allen Fällen günstiger herzustellen als jene in Differentialbauweise. Metallschäume oder mineralische Füllungen steigern die Produktionskosten nochmals und werden deshalb seltener angewendet. Nichtsdestotrotz erfuhren diese Materialverbunde in der Vergangenheit ein verstärktes Interesse der Forschungsgemeinschaft.

<sup>30</sup>Goldmann, F.: Die leichte Balance, in: Kunststoffe, Ausgabe 9/2010, S. 195. [Gol10]

<sup>31</sup>vgl. ebenda.

Schaumkerne bieten den Vorteil, dass durch die geschlossene Struktur auch an den Stirnseiten eine Bauteilverbindung möglich ist. Auch wird die Oberfläche der teilweise sehr dünnen Deckliner nicht durch sich abzeichnende Tragstrukturen eines Wabenkerns beeinträchtigt. Die richtige Auswahl der Zellgröße innerhalb des Schaums definiert die späteren Eigenschaften des Sandwich-Bauteils und ist sehr genau einzustellen. Nachteilig wirkt sich die Verbundtechnologie auf den Recyclingprozess aus, da die einzelnen Schichten nicht oder nur mit erheblichen Aufwand zu trennen sind.

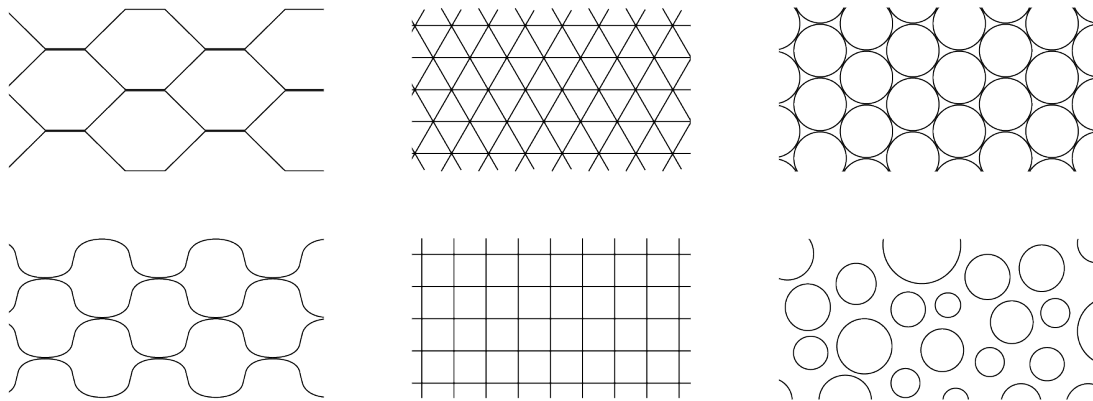


**Abbildung 2.9:** Vergleich von Integralbauweise (feinporiger Schaumkern) und Differentialbauweise (sechseckiger Wabenkern)

Die Produktion einer Sandwichplatte aus vielen Einzelteilen wird als Differentialbauweise bezeichnet. Hauptsächlich kommen stabile Strukturen zur Anwendung, welche Rechteck- und Rautenformen aufweisen bzw. eine Honigwaben- oder Wellenformen besitzen. (siehe Abbildung 2.9 rechts) Dies führt zu isotropen Materialeigenschaften des Kernmaterials und einem erhöhten Fertigungsaufwand durch Addition vieler streifenartiger Abstandshalter. Dieser Aufwand ist auch hinsichtlich einer Bauteilverbindung zu betreiben, da die recht großen Wabenzellen an den Stirnseiten zunächst mit einer *Pottingmasse* aufzufüllen sind. Dies betrifft jedoch nur die Stirnseiten, da flächige Verbindungen über die Deckflächen vergleichbar mit jenen der durch Integralbauweise produzierten Sandwichpaneele sind. Papier konnte sich trotz vermeintlich schwächerer Leistungsfähigkeit in Kombination mit der ureigenen Intoleranz gegen Feuchtigkeit als Wabenmaterial behaupten, da es einerseits leicht und günstig produzieren lässt und andererseits über sehr gute Stauchwiderstände bei gleichzeitig sehr geringer Materialstärke verfügt. Die Feuchteproblematik ist durch die Applikation wasserfester Deckschichten oder durch den gesicherten Einsatz in trockenen Umgebungen zu kontrollieren. Als vorteilhaft erweisen sich sortenreine Grundmaterialien sowie der Einsatz mehrerer Papierbahnen zur Erzeugung einer Wabenplatte. Deshalb liegt der Fokus der nachfolgenden Betrachtungen auf differentialproduzierten Sandwichstrukturen. Dabei wird diese Beschreibung der Abgrenzung zu den in dieser Arbeit untersuchten Wabenplatten aus Wellpappe dienen und daher nicht auf detailliertere Eigenschaften dieser Strukturen eingehen.

Kernstrukturen von Sandwichplatten mit Differentialbauweise setzen sich grundsätzlich aus drei unterschiedliche Prinzipien zusammen. Sechseckige Wabenstrukturen haben sich in der industriellen Produktion etabliert, da hier lange Streifen des Kernmaterials in einem kontinuierlichem Prozess sehr effizient zu produzieren sind. Seltener kommen Wellenformen zum Einsatz, da hier die Kontaktfläche zwischen zwei Streifen wesentlich geringer ist. Eine eine Abwandlung ist die SWAP-Wabenplatte, welche zwischen den wesentlich kleineren Wellenbahnen über Zwischenlagen verfügt. (siehe Kapitel 2.5.2).

Neben Kernstrukturen auf Basis von Sechsecken und Wellen (Abb. 2.10 links) existieren weitere geometrische Varianten zur Erzeugung eines wirksamen Sandwichkerns. Dabei können zwei weitere Arten ausgemacht werden. Die Steckverbindung linearer Streifen führt zu dreieckigen oder viereckigen Strukturen. Dies wird mittels abwechselnder halbhoher Einschnitte in den Streifen erreicht und erfordert einen hohen Herstellungsaufwand. Als vorteilhaft ist hier der Verzicht auf eine Verklebung zwischen den Streifen zu betrachten. Dabei finden häufiger schmale Streifen aus MDF Anwendung, da sich diese leichter zusammen stecken lassen. (Abb. 2.10 Mitte) Die Addition runder oder andersartig geformter Rohrabschnitte erzeugt eine Matrix mit großen Öffnungen innerhalb der Rohre und kleinen Öffnungen an den Restflächen. (siehe Abb. 2.10 rechts)



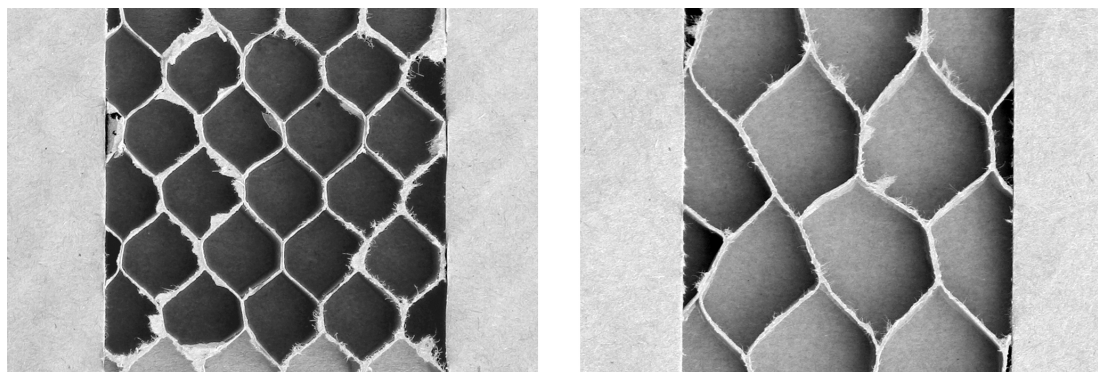
**Abbildung 2.10:** Varianten der Kernstruktur: parallele Hut- oder Wellenform (links), Stecksystem aus Dreiecken oder Rechtecken (mitte) und runde Rohrabschnitte mit identischen und unterschiedlichen Durchmessern (rechts)

Die technische Entwicklung auf dem Gebiet der Sandwichstrukturen erfolgt rasant und bringt vor allem in Kombination mit Kunststoffen immer leistungsfähigere Elemente hervor. Dabei ist die gegenteilige Entwicklung zweier Richtungen zu erkennen. Einerseits werden in hochkomplexen Produktionsprozessen die unterschiedlichsten Rohstoffe kombiniert, um die jeweils vorteilhaften Eigenschaften im Sandwich zu etablieren. Andererseits erfolgt die Rückbesinnung auf einfache und erprobte Prozesse. Hierbei besitzt das hergestellte Sandwich zwar nicht das geringste Gewicht oder die höchste Steifigkeit, ist aber hinsichtlich der einfachen Produktionsweise, der Recyclingfähigkeit und der Umweltbilanz über jeden Zweifel erhaben.

### Papierne Sandwichkerne in Differentialbauweise

Wabenplatten mit papierner Kernstruktur sind grÖßtenteils wie eine Honigwabe aufgebaut. Hierbei werden sehr dünne Papierstreifen hutfÖrmig abgekantet und längs auf den Stirnseiten platziert. Die gespiegelte Addition und Verbindung dieser Streifen an den Oberseiten der Hutform führt zu einem flächigen Gebilde mit einem sehr guten Material-Hohlraum-Verhältnis. Die Breite der Papierstreifen definiert die Höhe des Sandwich-Kerns und somit die Dicke der Wabenplatte. Diese Wabenplatten kommen standardmäßig im Möbelaufbau (Beklankung aus Echtholz furnier oder Kunststoff) und in der Verpackungsindustrie (Polstermaterial) zum Einsatz. Das Gewicht des Möbels wird stark reduziert, da eine große Menge an Holz als Konstruktionsmaterial eingespart wird.

Abbildung 2.11 stellt zwei dieser Wabenplatten im Vergleich dar, deren Kerne durch eine streifenfÖrmige Entfernung des Deckliners sichtbar sind. Die linke Abbildung zeigt eine Wabenplatte mit einer Stärke von 30mm und einer WabenÖffnungsweite von 12mm. Im proportionalen Vergleich dazu ist rechts eine Wabenplatte mit einer Stärke von 10mm und einer WabenÖffnungsweite von 20mm abgebildet. Je kleiner die Waben ausgeföhrt sind, je näher kommen diese dem Idealbild eines Sechsecks. Eine Erhöhung der WabenÖffnungsweite bewirkt einen ungleichmäßigen Verzug und damit eine strukturelle Disharmonie im Wabenbild. Dieser Verzug der Struktur ist gut in Abbildung 2.11 rechts zu erkennen.



**Abbildung 2.11:** Größenvergleich zweier Honigwaben-Kerne mit unterschiedlichen Höhen und Weiten

Sandwichpaneele können mit verschiedenen Decklagen aus Holz, Metall oder Kunststoff kombiniert werden. Dies führt zu hoch belastungsfähigen und dauerhaft haltbaren Bauteilen, deren Leistungsspektrum durch die gezielte Auswahl der Deckschichten weiter zu optimieren ist. Trotzdem sind diese Bauteile kritisch zu betrachten. Zunächst ist die schlechte Recyclingfähigkeit dieser gänzlich verklebten Elemente anzuföhren, denn in den meisten Fällen sind sie nicht zu recyceln und müssen aufwändig entsorgt werden. Des Weiteren stellt die Bearbeitung hohe Anforderungen an den Arbeitsschutz, da künstlicher Klebe- und Lösungsmittel im Produktionsablauf eingesetzt werden. Die bei der Bearbeitung dieser Bauteile anfallenden Stäube müssen vollständig abgesaugt und können in den seltensten Fällen weiterverwendet werden.

### SwissCell-Wabe

Ein Beispiel für eine in Differentialbauweise hergestellte Sandwichplatte ist die *SwissCell-Platte*. Das Produktionsverfahren wurde von der Firma SwissCell AG in Schaffhausen (Schweiz) patentiert und wird exklusiv angewendet.<sup>32</sup> Das Produkt ist eine Honigwabensandwichkonstruktion “auf Basis kunstharzgetränkter Cellulose.”<sup>33</sup> Die Grundlage bilden extrem dünne Papierstreifen, die mit einem patentierten Verfahren in eine sechseckige, kunstharzgetränkte Wabenstruktur überführt werden. Anschließend erfolgt die Verklebung von Deckschichten aus Kunststoffen, Holz oder Metallen. (siehe Abbildung 2.12 links) Die SwissCell-Platten verfügen bei einem sehr geringen Gewicht über extrem hohe Druckfestigkeit und eine sehr witterungsbeständige Struktur. Die Resistenz gegen Feuchtigkeit, diverse Säuren und Basen ist gegeben und führte zur Entwicklung einer Gebäudestruktur aus diesen Platten. Das *Universal Word House*<sup>34</sup> zeigt die Anwendungsmöglichkeiten als begehbare Gebäude. (siehe Abbildung 2.12 rechts)<sup>35</sup>



**Abbildung 2.12:** SwissCell-Wabenplatte und das Universal World House

Bei allen vorteilhaften Eigenschaften dieser Materialentwicklung dürfen die strukturellen Probleme hinsichtlich der Recyclingfähigkeit nicht außer Acht gelassen werden. Nach dem Einsatz als zugeschnittenes Element können die Wabenplatten am Ende des Lebenszyklus nur als Sondermüll entsorgt werden. Im Rahmen der hier vorgestellten Forschungsarbeit an Wabenplatten aus Wellpappe wurden auch diese SwissCell-Platten begutachtet, um den Kontext mit alternativen Bauteilen herstellen und eine Bewertung vornehmen zu können. Positiv hervorzuheben ist die schon angesprochene Belastbarkeit und Haltbarkeit. Negativ werden die erschwerte Bearbeitung sowie die unmögliche Rückführung des Materials in den Stoffkreislauf bewertet. Auch im Hinblick auf den Forschungsschwerpunkt der *Faltungen* von Wabenplatten eignen sich die SwissCell-Paneele nicht, da sie völlig steif sind und eine Faltung die Zerstörung des Elements zur Folge hätte.<sup>36</sup>

<sup>32</sup>Im Jahr 2011 musste das Unternehmen Konkurs anmelden. Eine Weiterführung der Produktion ist nach derzeitigem Kenntnisstand unklar.

<sup>33</sup>Knippers, J. et al: Atlas Kunststoffe + Membranen, 2010, S.61 [KCGL10]

<sup>34</sup>Entwurf: Professur InfAR (Prof. Dirk Donath) an der Bauhaus-Universität Weimar

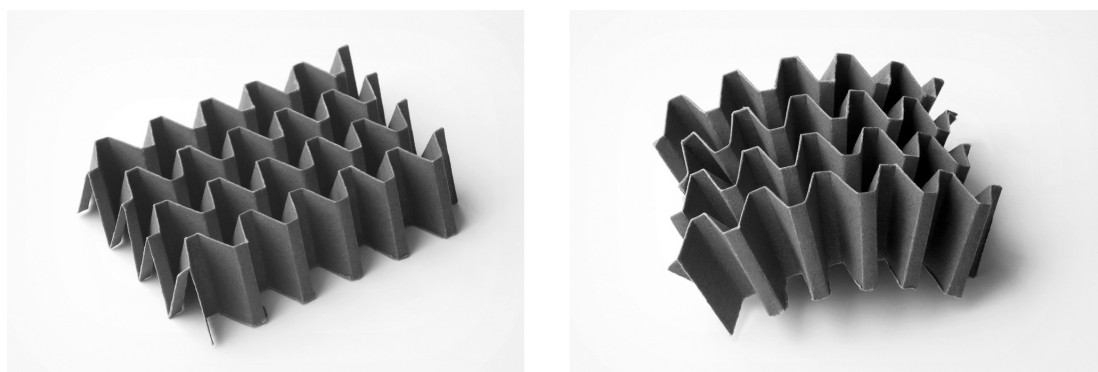
<sup>35</sup>Abbildung rechts aus: Jobbers, A.; Jahn, O: Prefab Houses, S. 375. [Cob14]

<sup>36</sup>Die Bearbeitung der SwissCell-Paneele zeigte Ausrisse der Sägekanten, eine starke Staubentwicklung bei Anschliff sowie das Aufplatzen der Klebekanten bei weiterer Bearbeitung.

### Foldcore Wabe

Im Bereich der papiernen Kernstrukturen sind viele beachtenswerte Entwicklungen zu beobachten. Die Foldcore GmbH, einer Ausgründung aus dem Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart, verbindet das Potential von Origami-Faltstrukturen mit High-Tech-Produktionsprozessen. Die von der Firma entwickelten Sandwich-Platten sind sehr leicht und extrem biegesteif. Grundlage sind Forschungen zum *Origami sekkei*, (technisches Origami), welches die Möglichkeiten des Papierfaltens auf technische Anwendungen überträgt. Der isometrische Faltprozess überträgt die Struktur spannungsfrei in eine ebenes Trägermaterial aus Papier und erzeugt eine zelluläre Kernstruktur, die ohne zusätzliche Einschnitte zwischen zwei Deckplatten gefügt werden.

Das Sandwich mit Papierkern wurde zunächst für die Luft- und Raumfahrt entwickelt. Im Laufe der Forschung wurden weitere Materialien wie Kunststoffe und Metallfolien auf ihre Faltbarkeit hin untersucht und führten zu einem beträchtlichen Kenntnisstand der Firma Foldcore, der weit über das Papierfalten hinaus geht. Mittlerweile bietet die Firma ein breites Produktspektrum an und ist in der Lage, eine Vielzahl an Halbzeugen zu verarbeiten.<sup>37</sup> Ein interessantes Feld weiterer Forschungen liegt in der Reaktion der Foldcore-Faltung auf Biegekräfte linear zur Wabe, wie sie in Abbildung 2.13 dargestellt ist. Hier ergeben sich große Potentiale in der Generierung gebogener Bauteile.



**Abbildung 2.13:** Foldcore-Wabe im Normalzustand und nach Verbiegung

Mit applizierten Deckflächen verhält sich das Sandwich völlig steif, während es ohne die stabilisierenden äußeren Begrenzungen biegeweichere Reaktionen zeigt. Bei punktueller Position der Einspannung sind antiklastische Verkrümmungen ablesbar. Zu untersuchen wäre hierbei die Applikation von Deckflächen nach dieser Verkrümmung zur Manifestation der erreichten Sattelfläche. Anwendung können diese geschwungenen Elemente vor allem in jenen Bereichen finden, wo besondere Designansprüche bei geringem Platzangebot zu realisieren sind.

<sup>37</sup>Laut Selbstbeschreibung ist die Firma Foldcore in der Lage, sehr unterschiedliche Materialien zu verarbeiten. Dazu gehören unter anderem Metalle, Kunststoffe, Thermoplaste, Duomere, Komposite, Gewebe, Aramide, Papiere und Pappen, Folien, Bleche sowie Hybridmaterialien. Quelle: <http://www.foldcore.eu>, Abruf am 10.04.2015

### Sandwichkerne in Differentialbauweise aus alternativen Werkstoffen

Der Designer Wassilij Grod entwickelte während seines Studiums des Produktdesigns an der Bauhaus-Universität Weimar die Sandwichplatte *Conbou*. (siehe Abb. 2.14 links) Sie verfügt über einem Kern aus lose verleimten Bambusrohr-Abschnitten. Laut Grod fällt bei "... der konventionellen Herstellung von Plattenmaterial aus Bambus ... üblicherweise bis zu 40% Verschnitt an." Durch die intelligente Platzierung der Rohrabchnitte und der damit einhergehenden frei bleibenden Restgeometrie ist die Sandwichplatte besonders leicht und spart Ressourcen. Die Entwicklung wurde mit zahlreichen ersten Preisen namhafter Wettbewerbe gewürdigt<sup>38</sup> und findet vor allem im Möbelbau Anwendung. (siehe Abb. 2.14 rechts)<sup>39</sup>



**Abbildung 2.14:** Leichtbauplatte *Conbou* mit Kern aus Bambusrohr-Abschnitten

Das Optimierungspotential dieser Leichtbauplatte ist beträchtlich und der Einsatz von Bambus als Pflanze mit dem weltweit schnellsten Wachstum bietet einen sehr nachhaltigen und ökologischen Ansatz. Ihre Anwendung beschränkt sich derzeit noch auf den Möbelbau, doch ist ein Einsatz als tragendes Bauteil nach Erforschung der statischen Kennwerte durchaus denkbar. Eine Faltung dieses Materials ist nicht möglich, da die Bambusabschnitte über eine sehr steife Struktur verfügen, welche nicht zu stauchen ist. Verbundbauteile aus vollständig recycelten Wabenplatten aus Wellpappe und Sandwichplatten mit Bambuskern sind unter Verwendung von Weißkleim realisierbar und wären in der Lage, die jeweiligen Vorteile effizient auszunutzen. Die offenen Stirnkanten werden geschickt als gestalterisches Element genutzt, sind jedoch relativ schlecht zur Verbindung mit weiteren Platten geeignet.

Bemerkenswert ist der ökologische Anspruch des Produkts, das bei sorgfältiger Auswahl der Klebemittel und der Deckflächen absolut nachhaltig zu produzieren ist. Die Produktion ist simpel und der Recyclingprozess läuft frei von schädlichen Emissionen ab.

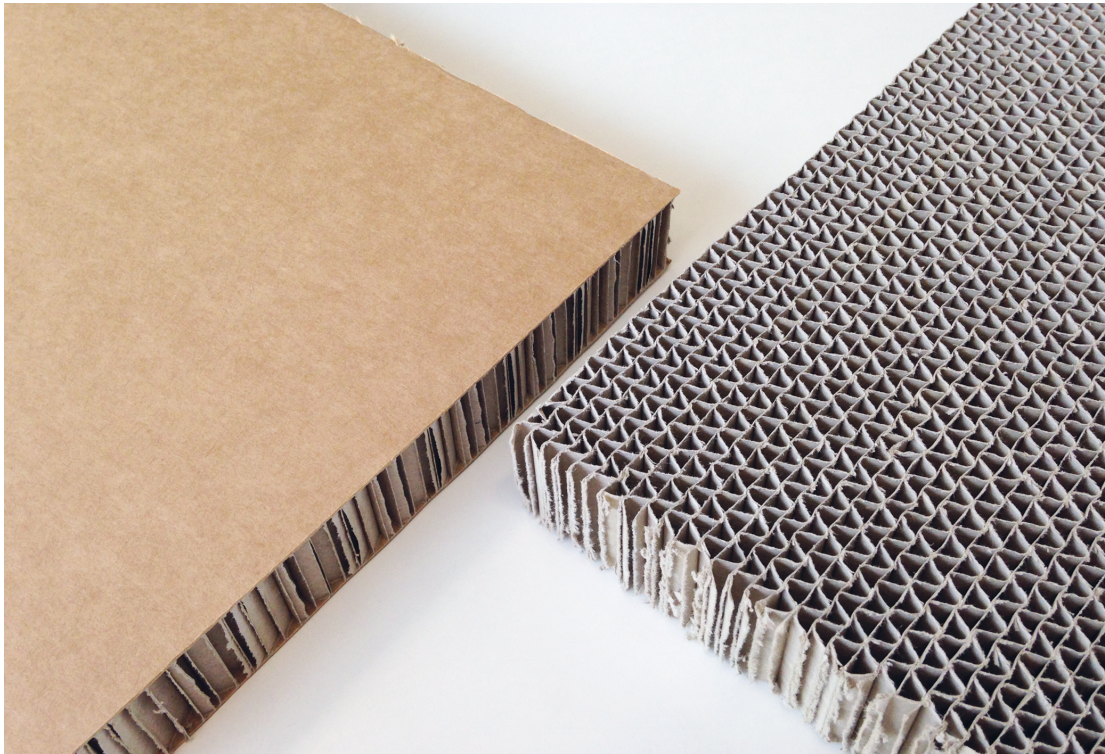
<sup>38</sup>Das Produkt konnte u.a. folgende Preise erringen: Adream Wettbewerb 2010, Interior Innovation Award 2013, Staged Design Award 2014.

<sup>39</sup>Abbildungen aus: [www.conbou.de](http://www.conbou.de), Abruf am 15.05.2015. [Gro15]



### 2.5.2 SWAP-Wabenplatten

Die in dieser Arbeit untersuchten Wabenplatten der Firma SWAP weisen gegenüber den oben erläuterten Kernstrukturen mehrere Besonderheiten auf. Zunächst sind sie der Gruppe der parallelen Wellenformen zuzuordnen, verfügen jedoch über eine weitere Lage Papier zwischen den gewellten Bahnen. Auch ist die Wellenhöhe wesentlich geringer als bei vergleichbaren Platten, da ihr Ursprung in den Wellpappen der Verpackungsindustrie zu finden ist. SWAP steht für *Swiss Altpapier Paletten* und beruht auf einem Patent von Fredy Iseli, dem Gründer der Firma.<sup>40</sup>



**Abbildung 2.15:** SWAP-Wabe mit und ohne Kaschierung

Die SWAP-Platten sind im Vergleich mit den oben vorgestellten Honigwabenplatten schwerer, da durch die geringerer Wellenhöhe mehr Material verbraucht wird. Dies ist im Hinblick auf die Aufgabenfelder der Platten nicht als Nachteil zu bewerten. Laut Florian Nagler, Entwicklungsleiter der Firma SWAP „... bietet die SWAP-Wabe eine höhere Steifigkeit als expandierte Waben, die herkömmlicherweise im Möbelbau zum Einsatz kommen. Vor allem bei größeren Bauteilen (z.B. breite und hohe Türen) scheint das der Fall zu sein.“<sup>41</sup> Die hohen Stabilitätswerte der Platte beschränken sich nicht nur auf die Druckfestigkeit vertikal zum Deckliner. Bei stirnseitiger Belastung nimmt die SWAP-Platte wesentlich höhere Lasten auf, was sie für den Einsatz als architektonisches Bauteil prädestiniert.

---

<sup>40</sup>Patent: DE19654672 A1

<sup>41</sup>Das schriftliche Interview wurde per E-Mail im Februar 2015 geführt.



### Materialkennwerte

Die Struktur der SWAP-Wabenplatten beruht auf dem immer wiederkehrenden Prinzip der Addition einer Wellenbahn mit dem Grobprofil A und einer ebenen Zwischenlage. Die genauen Kennwerte dieses Wellenprofils sind in Tabelle 4.1 auf Seite 203 aufgeführt. In Abbildung 2.16 ist gut zu erkennen, dass die Wellenberge und -täler nicht synchron sind, d.h. sie treffen sich nicht in einer vertikalen Achse. Dieser wünschenswerte Zustand ist produktionstechnisch nicht realisierbar.<sup>42</sup> Die Abbildung verdeutlicht auch die Möglichkeiten eines Einsatzes der Elemente ohne Deckliner. Bei Betrachtung der Struktur bei einem Winkel von 90° zur Oberfläche sind die Bereiche im Hintergrund gut zu erkennen. Ändert sich dieser Winkel, ist kein Durchblick mehr möglich. Diese Eigenschaft könnte bei Bauteilen interessant werden, welche ihre Stabilität mit einem Wabenkern realisieren und trotzdem eine Transparenz erzeugen sollen.

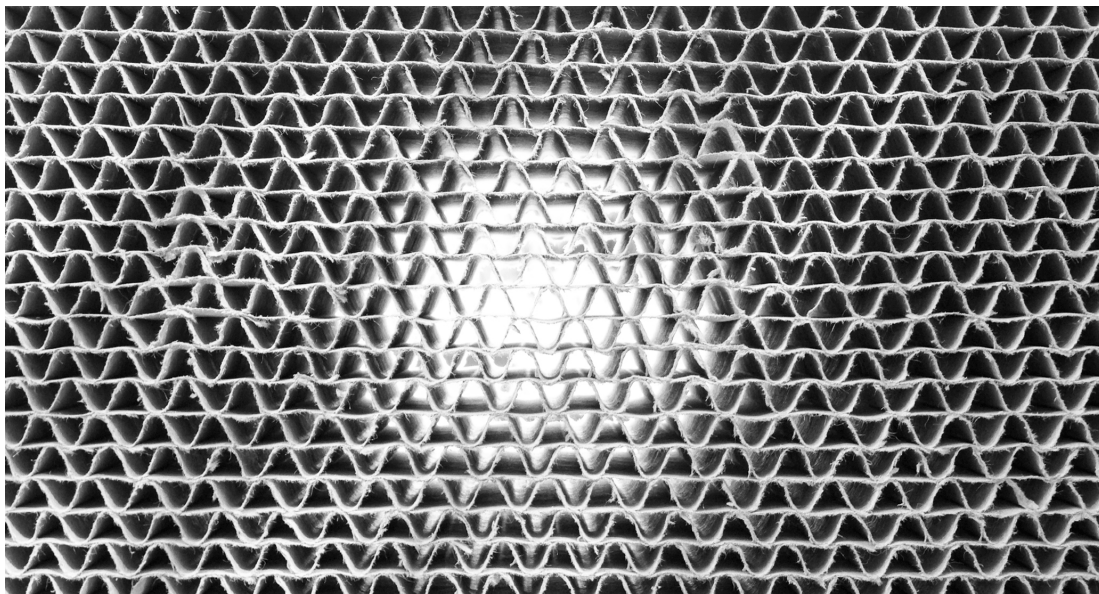


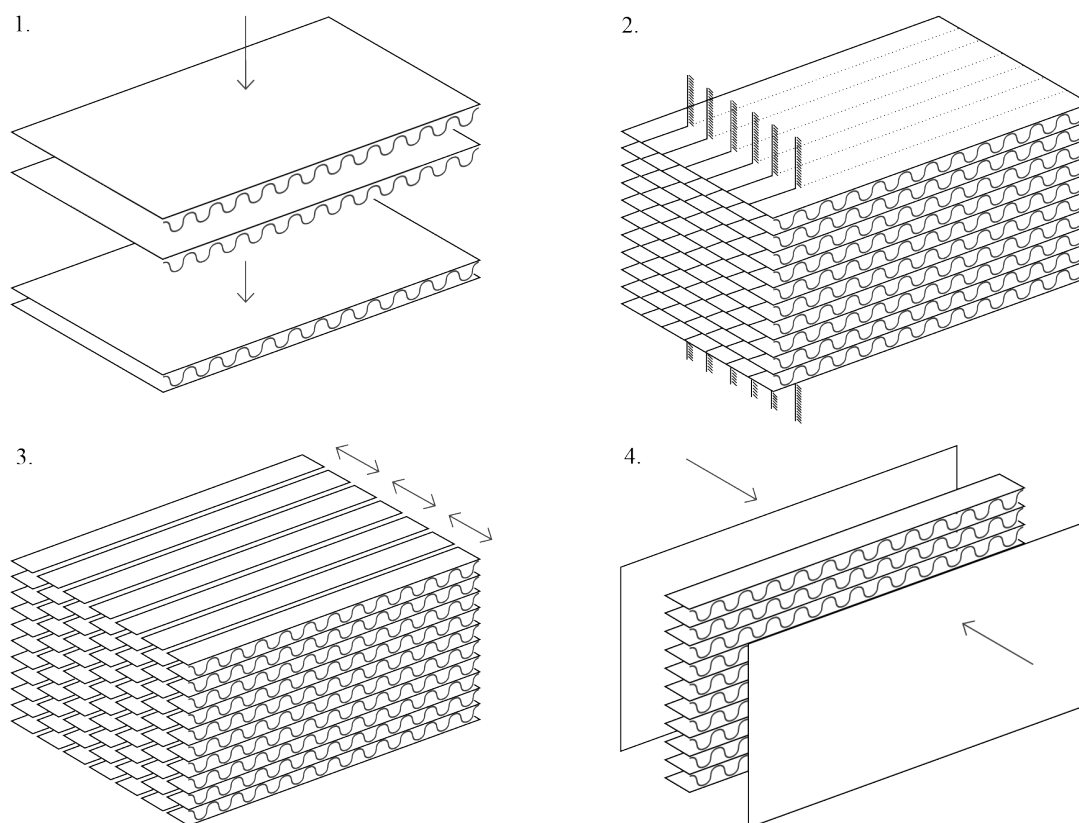
Abbildung 2.16: Struktur der SWAP-Wabe mit Durchsicht

Drei verschiedene Wellenpapiere und fünf verschiedene Deckliner stehen für die Produktion zur Verfügung. Eine detaillierte Beschreibung dieser Papiere erfolgt in Kapitel 3.1.2. Wird zunächst eine unkaschierte Wabenplatte betrachtet, so variiert deren Volumengewicht aufgrund der drei unterschiedlich schweren Wellenpapiere zwischen  $57\text{kg/m}^3$  und  $93\text{kg/m}^3$ . Mit Kaschierung steigt dieses Gewicht um den Wert des jeweils applizierten Deckliners. Die Firma SWAP liefert Wabenplatten mit einer Maximallänge von 3130mm, einer Maximalbreite von 1260mm und einer Maximaldicke von 80mm. Abstufungen nach Kundenwunsch sind möglich. Für die Verklebung der Well- und Decklage und auch für die Blockverklebung kommt Wasserglas (Natriumsilikat CAS 1344–09–8) zum Einsatz. Die Verklebung der Deckliner erfolgt mit handelsüblichen Weißleim.

<sup>42</sup>Eine tatsächliche Synchronität würde die stirnseitige Druckbelastbarkeit gegen die Wellenrichtung erhöhen, da die einwirkenden Lasten kontinuierlich abgeleitet und nicht zur Stauchung der Wellenbahnen führen würden.

### Produktionsprozess

Die Firma SWAP führt sämtliche Arbeitsschritte zur Produktion einer Wabenplatte im eigenen Haus durch. Nach Anlieferung des Rohpapiers auf einer Rolle erfolgt die Produktion der Wellenbahn wie in Abbildung 2.6 auf Seite 46 dargestellt. Danach erfolgt die Fügung zu Blöcken mit dem anschließenden Zuschnitt der Wabenplatten. Die Produktionsschritte sind nachfolgend schematisch dargestellt und werden abschnittsweise beschrieben.



**Abbildung 2.17:** Schema der Produktionsschritte der SWAP-Wabenplatten

1. Zunächst werden Wellenbahnen im Wechsel mit Zwischenlagen verleimt. Dieser Vorgang wird bis zur Bildung eines Blocks wiederholt.
2. Die Blöcke mit den Längen und Breitenabmessungen der späteren Wabenplatten werden mithilfe einer Mehrfach-Bandsäge in plattenförmige Wabenabschnitte zersägt, deren Dicke nach Kundenwunsch definiert ist.
3. Die Wabenabschnitte werden separiert und um  $90^\circ$  gedreht.
4. Abschließend erfolgt die unkaschierte Auslieferung an den Kunden oder die Kaschierung mit dem gewünschten Deckliner in einer Presse.

## 3 Forschungsergebnisse

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit werden neben theoretischen, mathematischen und graphischen Untersuchungen auch Belastungstests an vorliegenden Materialproben durchgeführt. Hierbei sollen umfassende Materialkennwerte gewonnen werden, um diese für die Herstellung statisch tragfähiger Bauteile aus Wabenplatten heranziehen zu können. Im Fokus steht dabei immer die Vergleichbarkeit der untersuchten Objekte. Hierfür werden die Wabenplatten selbst, aber auch Papiere untersucht, aus denen die Platten bestehen. Somit können die Papiere, welche für die Produktion der Wabenplatten in Frage kommen, ebenso miteinander verglichen werden wie die Materialstärken der Platten, aus denen tragfähige Bauteile bestehen. Für die Planung und Durchführung der nachfolgend beschriebenen Testreihen ist eine grundlegende Recherche zum Stand der Wissenschaft und Technik sowie bereits durchgeführten Testreihen und einer Zusammenfassung der Eigenschaften der zur Produktion verwendeten Papiere unerlässlich. Deshalb werden in Kapitel 3.1 zunächst die Papiereigenschaften und der Entwicklungsstand beleuchtet. Anschließend erfolgt in Kapitel 3.2 die nähere Analyse der Wabenplatten aus Wellpappe.

### 3.1 Forschungsfokus: Papiere

Für ein Verständnis der Materie empfiehlt sich die Einarbeitung in diverse Artikel, welche die detaillierte Untersuchung von Papier und Pappe in ihrem grundlegenden Aufbau auf Faserebene beschreiben. Dabei kann grundsätzlich zwischen dem Verhalten von Papier unter *ariden* (trockenen) und *humiden* (feuchten) Umweltbedingungen unterschieden werden.<sup>1</sup> Da Papier und Papierwerkstoffe ihre Tragfähigkeiten unter Feuchteeinwirkung teilweise oder gänzlich einbüßen, ist bei Überlegungen zur Konstruktion von tragfähigen Papierbauteilen grundsätzlich von einem feuchtegeschützten Einsatz der tragenden Bauteile auszugehen. Deshalb werden im Fokus dieser Forschungsarbeit vor allem die Papiereigenschaften bei Trockenheit beleuchtet, da die Stabilität des Experimentalbaus nur gegeben ist, wenn die gefalteten Rahmenbauteile vor Feuchtigkeit geschützt werden. Da dieser ideale Zustand in der Realität jedoch nicht zu erreichen ist, müssen Kenntnisse über das Verhalten von Papier bei Feuchteeinwirkung gewonnen werden, um die negativen Auswirkung kontrollieren und eindämmen zu können. Dabei ist der Unterschied zwischen *Feuchtdehnung* und *Nassdehnung* zu berücksichtigen.

---

<sup>1</sup>Hierbei werden die Begriffe *arid* und *humid* nicht im Sinne der ökophysiologische Klimaklassifikation angewendet sondern lediglich als Hinweisgeber, ob das Bauteil aus Wellpappe in einer trockenen oder feuchten Umgebung zum Einsatz kommt. Der in der Forschungsarbeit präsentierte Experimentalbau besitzt einen beheizten und somit trockenen Innenraum und einen der Umweltfeuchte ausgesetzten Fassadenbereich. Auf beide Bedingungen wird gesondert eingegangen.

Die Feuchtdehnung tritt bei Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit auf. Dadurch kann das Papier nach dem Feuchteeintrag wieder abtrocknen und eine irreparable Schädigung der Papierstruktur wird vermieden. Die Auswirkungen der Feuchtdehnung hängen von verschiedenen Faktoren wie dem Adsorptionsverhalten des Fasermaterials und seinem Spannungszustand ab.<sup>2</sup> Während die *Adsorption* nur die Oberfläche der Papierstruktur betrifft, dringt die Feuchte bei der *Absorption* tief in die Fasern ein. Steigt die relative Luftfeuchte über 70% oder tritt das Papier direkt mit Wasser in Kontakt, wird dies als Nassdehnung bezeichnet. Hierbei "... werden neben den Quelleffekten in der Faserzellularwand, die zur Feuchtdehnung führen, auch Spannungen im Papier gelöst, die auf die schrumpfungsbehinderte Trocknung zurückzuführen sind." Dieser Vorgang führt zu einer "irreversiblen Dimensionsänderung"<sup>3</sup> in der Papierstruktur und ist deshalb zu verhindern.

Das Abtrocknen der feuchten Papierfasern nach Adsorption bzw. Absorption wird als *Desorption* bezeichnet und ist ein fundamentaler Bestandteil der Feuchtere regulierung des Papiers. Somit ist bei der Planung der tragenden Bauteile aus Wellpappe bereits in der Entwicklungsphase zu überprüfen, in welcher Umgebung die Bauteile eingesetzt werden. Da im Außenbereich kein totaler Schutz für Feuchtigkeit zu gewährleisten ist, sind die Elemente stetig zu belüften und vor direktem Nässekontakt zu bewahren,

#### 3.1.1 Recherche zum Stand von Wissenschaft und Technik

Die Anisotropie des Papiers ist Gegenstand diverser Untersuchungen. Der natürliche Ursprung der gerichteten Fasern und die damit einhergehenden unregelmäßigen Materialeigenschaften machen regelmäßige Untersuchungen der Papiere unerlässlich. Hierzu leisten vor allem die universitären Forschungseinrichtungen einen wertvollen Beitrag. Da die Aufzählung aller Forschungsprojekte den Rahmen dieses Textes sprengen würde, seien hier nur einige wichtige genannt, welche die vorliegende Arbeit beeinflusst haben.

##### **Festigkeitseigenschaften von Papieren**

Burchardt analysiert in seiner Dissertation die Festigkeiten von Papier und weist zunächst darauf hin, dass die "... Bruchfestigkeit des Papiers nur 1/60 bis 1/50 der Faserfestigkeit erreicht." Die Unterschiede zwischen Faser und dem Fasergebilde Papier können also beträchtlich sein. Er beschreibt weiter, dass nicht nur die Faserlänge, sondern auch die Faserform und ihre Anordnung in der Blattstruktur einen entscheidenden Einfluss auf die Papierfestigkeit haben. Ferner geht er auf die Unterschiede zwischen mehrschichtigen und mehrlagigen Papieren ein und stellt hier verschiedene Leistungsverbesserungen fest.<sup>4</sup>

---

<sup>2</sup>Erhard, K.; Kretzschmar, J.: PTS Forschungsbericht 081042, S. 8. [EK11]

<sup>3</sup>ebenda, S. 8. [EK11]

<sup>4</sup>Burchardt, L.: Festigkeitseigenschaften einlagiger und mehrlagiger papierner Flächengebilde. [Bur96]

### Simulationen und Berechnungen zum Versagen unter Lasteinwirkung

Mäkelä und Östlund beschreiben verschiedene Rechenmodelle zur Vorhersage des Versagens von Papieren. Hierbei wird vor allem auf die Rissbildung eingegangen und eine Verbindung von Papierqualität und Vorhersagbarkeit des Versagensfalles hergestellt. Zwei Simulationsverfahren werden genauer beschrieben. Während das *cohesive crack model* sehr genaue Vorhersagen treffen kann, ist es umständlich zu kalibrieren und erzeugt unverhältnismäßig viele Datensätze. Das *isotropic deformation plasticity model* beschreibt die Plastizität des Papiers und trifft gute Vorhersagen, vernachlässigt aber die Gründe für das Versagen und den Einfluss der Anisotropie im Papier. In vergleichenden Spannungs-Dehnungs-Diagrammen werden die theoretischen Vorhersagen mit den Ergebnissen von praktischen Testreihen verglichen.<sup>5</sup>

Tryding zeigt in seiner Arbeit *In-Plane Structure of Paper* verschiedene Rechenmodelle zur Simulation der Rissbildung und des Weiterreißverhaltens von Papier auf und führt experimentelle und theoretische Überlegungen auf diesem Feld zusammen.<sup>6</sup> Vor allem das Verhalten der Proben vor dem Riss wird beleuchtet und illustriert. Zugversuche an unterschiedlichen Papiersorten werden detailliert ausgewertet und in einen Zusammenhang mit den theoretischen und numerischen Vorüberlegungen gebracht. Untersuchungen an laminierten und mit Öffnungen versehenen Papieren vervollständigen die Arbeit.

Weiterführend untersucht Tryding gemeinsam mit Gustafsson das Verhalten von Papieren mit Einkerbungen, wie sie bei gefalteten Zeitungspapieren auftreten. Beide Forscher beschreiben, was sich in gekerbten Papieren und vor allem der Bereich um den Riss herum beim Versagen abspielt. Hier werden theoretische Simulationen mit Versuchsreihen an Papieren mit einer Grammatur von 45g/m<sup>2</sup> verglichen. Der Fokus liegt hier in der Simulation des Rissverhaltens vor allem im Bereich der Kerbe.<sup>7</sup>

### Wirkung von Feuchtigkeit auf Papier

Das Kriechverhalten von Papier wird von Alfthan näher beleuchtet. Vor allem das beschleunigte Versagen der Tragstruktur von Papier unter Feuchteeinwirkung steht im Fokus. Zunächst werden mit empirischen Rechenmodellen die zu erwartenden Eigenschaften vorausgesagt und anschließend in verschiedenen Testreihen untersucht. Die Sorptionsfähigkeit des Papiers wird dabei von der inhomogenen Ausdehnung der Papierstruktur unter Einwirkung von Feuchte beeinflusst.<sup>8</sup>

---

<sup>5</sup>Mäkelä, P.; Östlund, S.: Evaluation of different constitutive models for fracture mechanics analysis of paper materials. [MÖ06]

<sup>6</sup>Tryding, J.: In-Plane Structure of Paper. [Try96]

<sup>7</sup>Tryding, J.; Gustafsson, P.J.: Analysis of Notched Newsprint Sheet in Mode I Fracture. [TG01]

<sup>8</sup>Alfthan, J.: Micro-mechanical modelling of mechano-sorptive creep in paper. [Alf04]

Alfthans Forschung bezieht sich auf die umfangreichen und lesenswerten Ergebnisse von Coffin et al., welche sich intensiv mit der Ausdehnung einzelner Papierfasern unter Feuchteinfluss beschäftigten.<sup>9</sup> Beschrieben werden die Unterschiede der Papier-Kriechraten in wechselnden und konstanten Luftfeuchtigkeiten. Während erstgenannte zu keinem messbaren Anstieg führen, bewirken konstant hohe Luftfeuchtigkeiten ein starkes Kriechverhalten. Diese Erkenntnis führte bei der Planung des Experimentalbaus zu der Vorgabe, eine hinterlüftete Fassade aus Papp-Wabenplatten zu installieren, um ein regelmäßiges Abtrocknen der feuchten Wabenplatten zu gewährleisten.

#### 3.1.2 Papiere der SWAP-Wabenplatten

Nach eingehender Materialrecherche und Sichtung der am Markt angebotenen Produkte, konnte die Firma *SWAP Sachsen GmbH* als Partner gewonnen werden. Sie beliefert vor allem die Automobilindustrie (Abdeckungen und Sandwichbauteile) sowie Produzenten von Spezialverpackungen. Weitere Einsatzgebiete der Wabenplatten sind Displaysysteme für Messen und Events, der Möbelbau und Produkte für die Bauindustrie. Alle zur Produktion herangezogenen Papiere werden auf Rollen angeliefert. Deren Breite definiert auch die Maximalbreite des Wellenstoffes und damit der Wabenplatten.

Das Produktportfolio dieses Herstellers entspricht den Forschungsvorgaben, die räumliche Nähe des Firmenstandortes in Frankenberg (Sachsen) zur Bauhaus-Universität Weimar ist gegeben und eine Kooperationsvereinbarung nebst Geheimhaltungsvereinbarung zu Forschungsergebnissen ist beschlossen. Die Produktion dieser Wabenplatten wird in Kapitel 2.5.2 beschrieben. Die Firma SWAP verarbeitet zur Herstellung der Wabenplatten fünf verschiedene Deckenpapiere (zwei Testlinerpapiere, zwei Kraftlinerpapiere und ein Kraftersatzpapier) und appliziert diese auf einen Wabenkern aus Wellenstoff. Nachfolgend werden die Eigenschaften dieser Papiere erläutert.

##### **Wellenstoff (110g/m<sup>2</sup>)**

Zur Produktion der Wabenkerne einer SWAP-Platte kommen Wellenpapiere zum Einsatz, welche über eine geringere Grammatur und Dicke als die Deckliner verfügen. Der in den untersuchten Wabenplatten verwendete Wellenstoff wird aus 100% Recyclingfasern produziert und verfügt über eine Grammatur von 110g/m<sup>2</sup>.<sup>10</sup> Bei einer Dicke von 140–159µm besitzt das Papier einen Flachstauchwiderstand von 170N sowie eine Restfeuchte von 7,5%. Da das Wellenpapier für den Wabenkern festgelegt ist, rückt eine Untersuchung und genaue Klassifizierung der zur Verfügung stehenden Deckenpapiere in den Fokus.

---

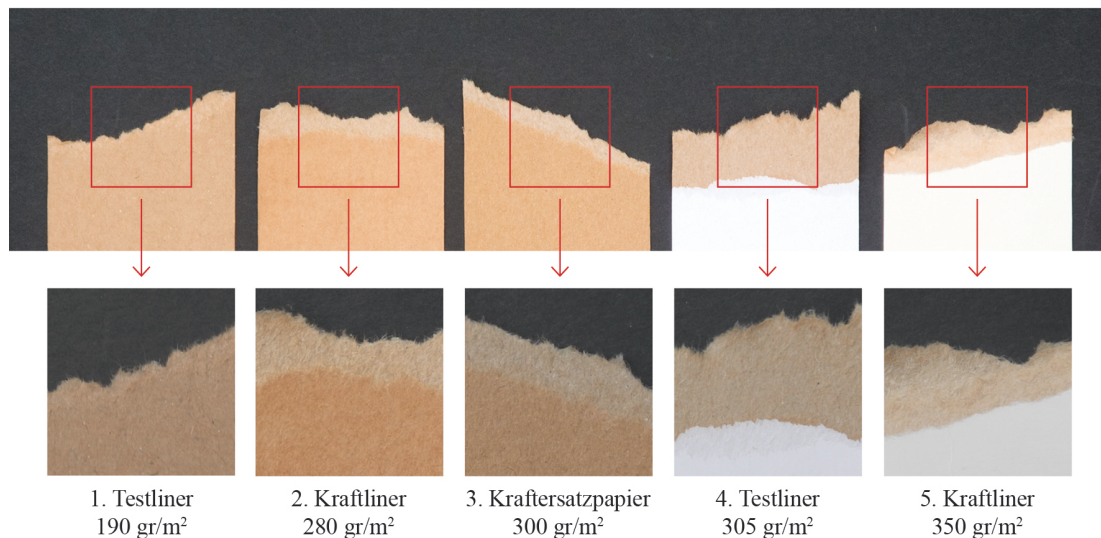
<sup>9</sup>Coffin, D. W. et al.: Tensile Creep Behavior of Single Fibers and Paper in a Cyclic Humidity Environment. [CB97]

<sup>10</sup>Diese Grammatur bezieht sich auf das getestete Produkt *Excelent Board*. Daneben steht noch ein *Classic Board* zur Verfügung, welches aus einem Wellenstoff mit einer Grammatur von 90g/m<sup>2</sup> produziert wird. Zur Produktion stärkerer Wabenkerne werden Wellenpapiere mit Grammaturen von 115g/m<sup>2</sup> und 160g/m<sup>2</sup> verarbeitet.

Die Firma SWAP behält sich vor, die Hersteller der Deckliner nicht zu nennen, da diese aufgrund marktwirtschaftlicher Preisschwankungen und Lieferbedingungen häufig wechseln. Die Kenndaten der Papiere sind jedoch sehr genau festgelegt, was ihre Austauschbarkeit vereinfacht. Es werden hierbei nur die Papiereigenschaften bestimmt. Eine genaue Zusammensetzung wird auch von den Produzenten der Rohpapiere nicht veröffentlicht. Die für diese Arbeit vorliegenden Werte beschränkten sich auf die Rollenbreite, die Grammatur, die Restfeuchte im Papier, die Berstfestigkeit, den Streifenstauchwiderstand, die Grammatur, die Restfeuchte sowie den Cobb-Wert.<sup>11</sup>

Die nachfolgend beschriebenen Versuchsreihen haben einerseits zum Ziel, vorhandene Parameter zu bestätigen und andererseits wichtige Materialkennwerte für den Einsatz der Wabenplatten als Architekturbauteile zu ermitteln. Der Untersuchungsfokus liegt dabei auf:

- Grammatur
- Dicke bzw. Materialstärke
- Zugfestigkeit in Faserrichtung
- Zugfestigkeit gegen die Faserrichtung
- Verhalten gegenüber eindringender Feuchtigkeit sowie Flüssigkeiten



**Abbildung 3.1:** Rissproben an fünf Testpapieren

<sup>11</sup>Der Cobb-Wert gibt das Wasseraufnahmevermögen von Papiererzeugnissen. Bei Papier bestimmen die Wasseraufnahmewerte die Qualität einer Bedruckung und bei Wellpappe findet er Anwendung in der Stabilitätsberechnung.

Vorangestellt werden subjektive Aussagen zur optischen Erscheinung, der haptischen Wirkung und dem Rissbild nach einem händischen Rissversuch. Tabelle 4.2 auf Seite 203 führt alle fünf Deckliner und ihre Materialeigenschaften auf. Nachfolgend erfolgt die Beschreibung grundlegender Materialeigenschaften sowie der optischen Erscheinung der fünf Papiere, die in Abbildung 3.1 anhand händisch durchgeführte Rissproben vorgestellt werden.

#### **Testliner (190g/m<sup>2</sup>)**

Das Papier ist mit einer Grammatur von 190g/m<sup>2</sup> das leichteste Testobjekt aller fünf Sorten. Es wird aus 100% recyceltem Altpapier produziert, hat eine braun-beige Farbe und wird als Standardpapier am häufigsten zur Kaschierung der Wabenplatten herangezogen. Die Dicke beträgt 268μm. Die Papieroberfläche ist rau und zeigt viele kleine Einschlüsse, die auf das verwendete Recyclingpapier zurückzuführen sind. Die Restfeuchte im Papier beträgt 7,5%. Der Berstfestigkeitswert wird mit 374kPa angegeben. Der Rissversuch zeigt eine gleichmäßige und geringe Rissbreite mit durchgehender Färbung.

#### **Kraftliner (280g/m<sup>2</sup>)**

Das nächststärkere Papier verfügt über eine Grammatur von 280g/m<sup>2</sup>, eine Dicke von 348μm und hat ebenfalls eine braun-beige Farbe. Im Gegensatz zum ersten Papier ist die Farbe leicht dunkler und die Oberfläche etwas glatter. Die Berstfähigkeit ist mit 840kPa mehr als doppelt so groß wie jene des ersten Testliners, was auf einen sehr hohen Anteil an Frischfasern zurückzuführen ist. Der Altpapieranteil liegt bei ca. 30% und die Restfeuchte beträgt 8,0%. Die Rissbreite ist ähnlich wie jene des Vorgängers, zeigt in der Färbung aber deutliche Unterschiede zwischen Vorder- und Rückseite des Papiers.

#### **Kraftersatzpapier (300g/m<sup>2</sup>)**

Die Grammatur des folgenden Papiers fällt mit 300g/m<sup>2</sup> nur unwesentlich höher aus als jene des Kraftlinerpapiers. Die Dicke von 410μm ist erwartungsgemäß höher als die des Vorgängers. Ein sehr hoher Anteil an Recyclingpapier wird mit einem geringen Anteil an Frischfasern kombiniert, um eine höhere Festigkeit als reines Recyclingpapier zu erhalten. Die Produktion ist dabei günstiger als die des Kraftliners. Die braun-beige Farbe tendiert ins gelbliche und ähnelt dem ersten Testlinerpapier. Die Rauigkeit entspricht in etwa dem ersten Testlinerpapier. Die Berstfähigkeit entspricht mit 840kPa exakt den Werten des Vorgängers. Hier liegt die Vermutung nahe, dass eine eventuelle Stabilitätsschwächung des Papiers durch einen höheren Anteil an Recyclingfasern durch die höhere Grammatur ausgeglichen wird und zu identischen Werten führt. Die Restfeuchte beträgt 7,5%. Der Rissverlauf ist geradliniger und gleichmäßiger. Ein eindeutiger Farbunterschied zwischen Vorder- und Rückseite ist gut zu erkennen.



**Testliner (305g/m<sup>2</sup>)**

Das hellste aller Papiere verfügt über einen Anteil von 100% recyceltem Altpapier. Trotz einer minimal höheren Grammatur von 305g/m<sup>2</sup> und einer einseitig aufkaschierten PE-Folie von 15g/m<sup>2</sup> ist dieses Papier mit 350µm etwas dünner als das Kraftersatzpapier. Dies ist auf den Kaschierprozess zurückzuführen, welcher die Dicke des Bogens unter Druck verringert.<sup>12</sup> Die kaschierte Seite wird dadurch wesentlich glatter als das verwendete Papier selbst. Der Berstfestigkeitswert beträgt wie bei den beiden Vorgängern 840kPa. Die Restfeuchte im Papier beträgt 7,0%. Die Rissbreite ist im Gegensatz zu den anderen getesteten Papieren wesentlich größer und auch bei der aufkaschierten PE-Folie ist ein stufenweiser Abriss zu erkennen.

**Kraftliner (350g/m<sup>2</sup>)**

Das stärkste Papier im Testfeld verfügt über eine Grammatur von 350g/m<sup>2</sup>, eine Dicke von 507 µm und ebenfalls über eine Kaschierung mit weißer PE-Folie. Die braun-beige Farbe des Rohpapiers geht wesentlich stärker ins rötliche als alle anderen Papiere. Die Restfeuchte ist mit 8,1% angegeben. Der Berstfestigkeitswert ist mit 870kPa der höchste im Testfeld. Eine wesentlich kleinere Rissbreite ist zum ebenfalls kaschierten Vorgängerpapier zu verzeichnen. Die PE-Folie zeigt ebenfalls einen klaren Riss ohne Abstufungen.

**3.1.3 Messung der Grammaturen**

Aus marktwirtschaftlichen und betriebstechnischen Gründen werden die von der Firma SWAP Sachsen GmbH zur Wellpappenproduktion herangezogenen Papiere von mehreren Produzenten angeliefert. Dies macht die Definition exakter Produkteigenschaften notwendig, welche auf mitgelieferten Datenblättern beschrieben sind. Die Grammaturen der Papiere sind dort mit einer Toleranz von  $\pm 3\%$  festgelegt. Zur Überprüfung dieser Toleranzen und der Richtigkeit der Angaben auf den Datenblättern werden Gewichtsmessungen an Probepapieren durchgeführt.

**Material und Methoden**

Von den fünf zur Verfügung stehenden Papieren werden jeweils 15 exakt beschnittene Probestücke angefertigt. Die Abmessungen der Proben betragen 297mm x 210mm (Format: DIN A4). Zur Messung kommt die geeichte Präzisions-Laborwaage *LC 621P* der Master-Serie der Firma *Sartorius* zum Einsatz. Sie verfügt über eine Standardabweichung von  $\leq \pm 0,001\text{g}$  und eine Abdeckhaube, um einheitliche Bedingungen ohne einwirkende Luftbewegungen zu schaffen. Die Papierproben werden vorab für 24 Stunden im Messlabor gelagert, um eine Anpassung an die Umgebungsfeuchte von 55% zu erreichen. Die Umgebungstemperatur beträgt 20°C.

<sup>12</sup>Die Kaschierung mit einer Folie aus Polyethylen bewirkt die Verbesserung der Feuchtebeständigkeit, erhöht die Oberflächenstabilität und erleichtert eine anschließende Bedruckung.

#### Durchführung

Beginnend mit dem leichtesten Papier werden alle 15 Probestücke nacheinander auf die Waage aufgelegt. Nach kurzer Wartezeit wird das Ergebnis angezeigt und abgelesen. Anschließend erfolgt die Eingabe dieser Werte in einer Excel-Tabelle, welche automatisch das Gewicht pro Quadratmeter und die Durchschnittsgrammatur errechnet. Im Anschluss werden alle 15 Probestücke gemeinsam aufgelegt, um das Durchschnittsgewicht zu erhalten. Aus beiden Werten erfolgt die Berechnung eines Mittelwertes, der mit der Soll-Grammatur verglichen wird.

#### Ergebnisse

Tabelle 4.3 auf Seite 204 zeigt die ermittelten Ergebnisse in tabellarischer Form und führt die von den Herstellern angegebenen Werte mit den gemessenen Werten der Versuchsreihen zusammen. Das arithmetische Mittel spiegelt jeweils alle fünf Proben einer Papiersorte wieder. Die Abweichung vom Soll-Wert ist in Prozent angegeben.

#### Schlussfolgerungen

Die überprüften Probestücke weisen nur minimale Abweichungen auf. Dies ist auf die exakte Größe der Probekörper und die Abstammung aus einer Papierbahn zurückzuführen. Bei Untersuchungen von Probestücken verschiedener Zulieferbetriebe sind größere Abweichungen denkbar, müssten dann jedoch in einer eigenen Versuchsreihe evaluiert werden. Dies ist in der vorliegenden Testreihe nicht realisierbar, da jeweils nur eine Papiersorte des jeweiligen Zulieferers zur Verfügung steht und keine Alternativprodukte zugänglich sind. Die größte Abweichung zwischen einzelnen Probestücken beträgt 1,23g zwischen den Proben Nr. 7 und Nr. 13 des Kraftersatzpapiers. Dies entspricht 19,7g/m<sup>2</sup> bzw. 6,15%.

Im Hinblick auf die zu erwartenden Leistungsdaten der gesamten Wabenplatten sind diese Abweichungen zu vernachlässigen. Einen größeren Einfluss auf die Grammatur der Probestücke müsste die einwirkende Umgebungsfeuchte haben. Da die Ergebnisse jedoch Unterschreitungen (−1,55%) und Überschreitungen (+2,66%) der Soll-Grammatur belegen, ist dies ebenfalls zu vernachlässigen. Genauere Ergebnisse würden Testreihen liefern, welche den exakten Feuchtegrad der Proben inkludieren. Dies ist nicht Gegenstand dieser Untersuchungen.

Abschließend wird festgehalten werden, dass alle fünf Papiere der getesteten Charge die Vorgabe einer Toleranz von  $\pm 3\%$  erfüllen, hierbei aber von der Umgebungsfeuchte und der exakten Zuschnittsgröße der Probekörper beeinflusst werden. Da alle Proben aber unter denselben Bedingungen in einem Zeitraum von <2 Stunden geprüft werden, sind die Ergebnisse als verifiziert zu betrachten.

### 3.1.4 Zugfestigkeit der SWAP-Papiere

Nach Begutachtung der optischen und haptischen Eigenschaften sowie der Überprüfung der Grammaturen der fünf Papiersorten werden Zugversuche durchgeführt, um die Belastbarkeit unter einwirkenden Zugkräften zu erhalten. Hierbei wird grundsätzlich zwischen einem Lasteintrag in Maschinenrichtung und Querrichtung unterschieden. Es wird davon ausgegangen, dass die Zugfestigkeit der Proben in Maschinenrichtung wesentlich höher sein muss als quer zum Faserverlauf. Dies wird durch einfache händische Rissversuche mit nachträglicher Begutachtung des Rissbildes abgeleitet. Wird das Papier gegen die Faserrichtung zerrissen, sind diese Bereiche wesentlich breiter und inhomogener als in Längsrichtung. Einzig das leichteste Testlinerpapier mit  $190\text{g/m}^2$  zeigt in Längs- wie in Querrichtung ein sehr ähnliches Rissbild. Die beiden PE-kaschierten Papiere (Testliner mit  $305\text{g/m}^2$  und Kraftliner mit  $350\text{g/m}^2$ ) zeigen dabei ein uneindeutigeres Rissbild als die braunen Probekörper, da die aufkaschierte PE-Folie durch ihre isotropen Eigenschaften dem anisotropen Verhalten des Papiers entgegenwirkt.<sup>13</sup>

#### Material und Methoden

Einen großen Einfluss auf die Zugfestigkeit hat der Feuchtegehalt der Papierprobe. Im Rahmen dieser Testreihe sind verschiedene Feuchtegrade und deren Einfluss auf die Zugfestigkeit der Papiere nicht Gegenstand der Untersuchungen, da eine Vergleichbarkeit der Papiere im Fokus der Untersuchungen steht. Somit ist lediglich zu gewährleisten, dass alle Proben den gleichen Umweltbedingungen ausgesetzt sind. Deshalb wird die Papierfeuchte aller Proben durch Lagerung am Versuchsstandort an die Umgebungsbedingungen angeglichen.

Ziel der Zugversuche dieser Testreihe ist die Evaluierung und der Vergleich aller fünf Deckliner, die in Kapitel 3.1.2 vorgestellt werden. Im Fokus steht die breitenbezogene Bruchkraft in kN und die Bruchdehnung A in Millimetern der jeweiligen Proben in Maschinen- und Querrichtung. Grundlage für die Testreihen bildet die *DIN EN ISO 1924-2* vom Mai 2009.<sup>14</sup> Diese Norm definiert die breitenbezogene Bruchkraft als "maximale Zugkraft je Breitereinheit des Materials, die Papier und Pappe unter den in der Versuchsanordnung festgelegten Bedingungen nach dieser Internationalen Norm aushalten, bevor sie reißen." Die Bruchdehnung beschreibt das "Verhältnis der gemessenen Längenänderung zum Zeitpunkt des Durchreißen einer Probe aus Papier während des Ausdehnens unter Standard-Prüfbedingungen zur Anfangslänge."<sup>15</sup> Vorgegeben sind Probestücke mit einer Länge von 180mm und einer Breite von 15mm. Die Dehngeschwindigkeit ist bei konstant 20mm/min festgelegt und soll eine Fehlergrenze von  $\pm 1\%$  einhalten. Dabei müssen die Einspannklemmen in einer Ebene ohne Torsion liegen. Das zur Anwendung gekommene Prüfgerät<sup>16</sup> erfüllt alle Anforderungen.

<sup>13</sup>Während Papierwerkstoffe durch ihre Faserrichtung eindeutig anisotrope, also richtungsabhängige, Eigenschaften aufweisen, sind die Zugfestigkeiten der Folien in alle Richtungen der Fläche nahezu identisch.

<sup>14</sup>DIN 1924-2: Papier und Pappe - Bestimmung von Eigenschaften bei Zugbeanspruchung - Teil 2, Mai 2009. [DIN09]

<sup>15</sup>ebenda, S. 5ff

<sup>16</sup>Prüfmaschine: walter+bai, LFM 250/20 kn mit Kraftmessdose GTM, Serie K, 20kN

Die Proben werden 24 Stunden vorher am Versuchsort deponiert, damit sich diese an die konstanten Umweltbedingungen (Temperatur: 19,8°C, Luftfeuchte: 36,1%) anpassen. Pro Papiersorte und Faserrichtung werden jeweils fünf Probestücke erstellt. Zusätzlich sind fünf längsgerichtete und fünf quergerichtete Streifen des Testlinerpapiers (190g/m<sup>2</sup>) mithilfe einer Verklebung mit Weißleim aufzudoppeln und ebenfalls zu untersuchen. Grund hierfür sind Überlegungen zur doppelten Kaschierung von Wabenplatten und der damit einhergehenden Veränderung dieser Festigkeitswerte. In Summe werden in dieser Testreihe 60 Probekörper erstellt und zugbeansprucht. Diese werden fortlaufend mit dem Muster "Grammatur + Laufrichtung + Nummer" für die einfachen und mit "2 x Grammatur + Laufrichtung + Nummer" für die aufgedoppelten Probekörper bezeichnet und in einer Excel-Tabelle geführt. Hierfür ist festgelegt, dass bei der Berechnung des Mittelwertes der fünf Einzelergebnisse das geometrische Mittel zu bilden ist, da es die Verhältnisänderungen im Zugversuch besser darstellt als das arithmetische Mittel.

#### Durchführung

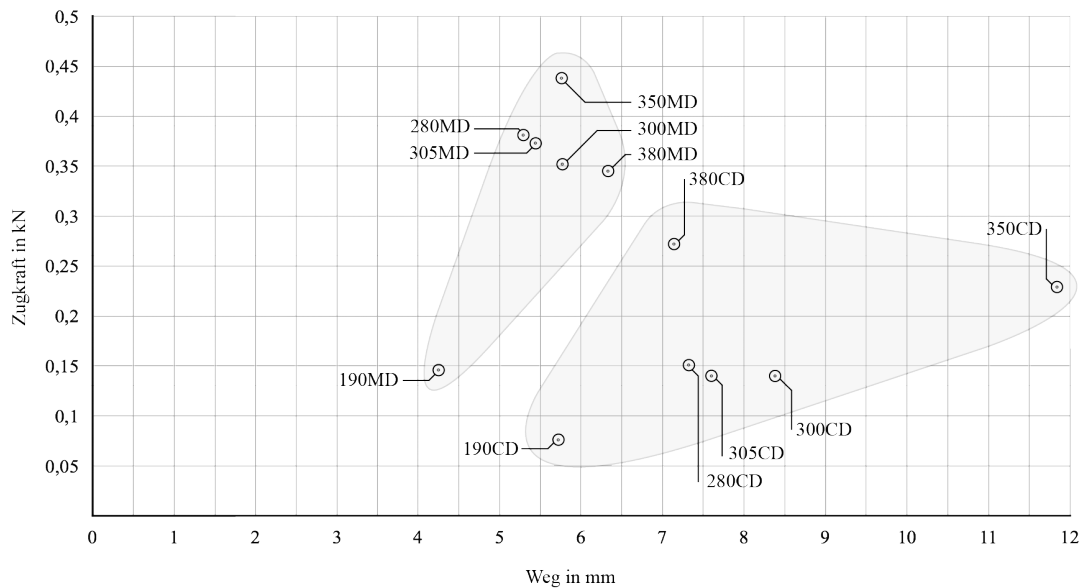
Das Zugprüfgerät verfügt über eine feststehende untere und über eine fahrbare obere Einspannklemme. Nach Arretierung des Probekörpers in der unteren Klemme wird die obere soweit verfahren, bis das Papier ohne Zerrung oder Stauchung eingespannt werden konnte. In Mikroschritten wird nun der Punkt angefahren, bei dem das Papier über eine Spannung verfügt. Anschließend wird das Prüfverfahren gestartet und die erzielten Ergebnisse in die Excel-Tabelle eingelesen. Dort erfolgt die automatische Umrechnung der Messergebnisse von N/15mm in N/m sowie die Generierung des geometrischen Mittels aller fünf Ergebnisse. Die Werte sind nun grafisch in ein Spannungs-Dehungs-Diagramm zu überführen. Die X-Achse beschreibt den zurückgelegten Fahrweg des Zugprüfgeräts und die Y-Achse zeigt die Zugkraft in kN.



Abbildung 3.2: Probekörper (links) und Zugversuch (rechts)

## Ergebnisse

In der Testreihe können alle gewünschten Datensätze ermittelt sowie tabellarisch und grafisch aufbereitet werden. In Tabelle 4.4 auf Seite 204 sind die breitenbezogenen Bruchkräfte der Papierproben in Maschinenrichtung MD und Querrichtung CD aufgeführt. Die sechs Einzelwerte sind jeweils in kN/15mm und gesondert als Mittelwerte angegeben. Diese zeigen die Unterschiede zwischen MD und CD sehr deutlich. In Maschinenrichtung ist eine enorme Leistungssteigerung zwischen 190MD und den restlichen fünf Ergebnissen abzulesen, welche sich alle auf einem ähnlichen Niveau bewegen. In Querrichtung ist eine kontinuierliche Steigerung der Bruchkraft mit Zunahme der Grammaturnumgebung ablesbar.



**Abbildung 3.3:** Versagen der Proben unter einachsiger Zugbelastung

Neben der breitenbezogenen Bruchkraft konnte auch die Längenausdehnung der Papierstreifen vor dem Bruch in Millimetern ermittelt werden. Diese Bruchdehnung wird ebenfalls für die Maschinen- und Querrichtung ermittelt. Die Aufbereitung erfolgt in Tabellen 4.5 auf Seite 205. Der interpolierte Mittelwert wird hierbei nur erhoben, um die Bruchdehnung der Proben vergleichen zu können. Auch bei diesen Werten sind Unterschiede zwischen Maschinen- und Querrichtung ablesbar. Während sich bei MD Werte für die maximale Länge vor dem Bruch im Bereich von 4,25 – 6,33mm bewegen, sind die Unterschiede bei CD wesentlich differenzierter.

Die Proben weisen in Querrichtung eine wesentlich höhere Elastizität auf und zeigen Maximallängen von 5,72 – 11,84mm. Abbildung 3.3 führt die ermittelten Ergebnisse grafisch zusammen und zeigt Versagensfälle aller Proben. Durch die graue Einfärbung sind die Unterschiede zwischen Maschinen- und Querrichtung gut zu erkennen.

#### Schlussfolgerungen

Die vorhergehende Annahme, dass die Papiere in Maschinenrichtung über eine wesentlich größere Zugbelastbarkeit verfügen als in Querrichtung, wird durch die Testergebnisse bestätigt. Im Gegensatz zur Längsrichtung ist quer eine leicht erhöhte Bruchdehnung erkennbar und die Ergebnisse zeigen ein abruptes Versagen. Eine obere und untere Streckgrenze ist nicht erkennbar.

Mit Ausnahme des Papiers mit einer Grammatur von  $190\text{g/m}^2$ , das über eine breitenbezogene Bruchkraft von  $1,00\text{kN/m}$  verfügt, liegen die Ergebnisse aller anderen Papiere sehr dicht beieinander, was gut in Abbildung 3.3 in der linken grauen Fläche zu erkennen ist. Der höchste Wert wird mit  $3,00\text{kN/m}$  erwartungsgemäß vom Papier 350MD mit der höchsten Grammatur erreicht. Leicht unterhalb rangieren die Proben 280MD ( $2,59\text{kN/m}$ ), 300MD ( $2,45\text{kN/m}$ ) und 305MD ( $2,69\text{kN/m}$ ) in einem vergleichbaren Bereich. Werden die Proben 280MD und 305MD verglichen, so sind die Werte nahezu identisch. Die aufkaschierte PE-Lage von Probe 305MD scheint die theoretisch schlechteren Bruchdehnungswerte des dickeren Testlinerpapiers gegenüber dem etwas dünneren Kraftlinerpapier 280MD auszugleichen. Dies kann aber nur vermutet werden, da keine breitenbezogene Bruchkräfte eines unkaschierten Testliners mit der gleichen Grammatur erhoben werden. Interessanterweise erreicht die mit Weißleim aufgedoppelte Probe 380 MD ( $2,44\text{kN/m}$ ) lediglich ähnliche Werte wie das Krafteratzpapier 300MD, obwohl der zur Verbindung verwendete Leim eine Erhöhung der Bruchkraft vermuten lässt. Die Verdopplung der Grammatur zuzüglich Leim erhöht zwar die Bruchkraft um 244% gegenüber 190MD, doch ist die erwartete Leistungssteigerung gegenüber 300MD und 350MD ausgeblieben. Im Bereich der Bruchdehnung zeigen alle Proben in Maschinenrichtung relativ ähnliche Werte im Bereich von  $4,25 - 5,76\text{mm}$ . Den höchsten Wert erzielt hier die aufgedoppelte Probe 380 MD mit  $6,33\text{mm}$ .

Die Untersuchung der Papiere in Querrichtung zeigt große Unterschiede zu den eben erläuterten Ergebnissen. Zunächst ist die wesentlich geringere breitenbezogene Bruchkraft hervorzuheben. Dies ist auf die wesentlich kleineren Bindungskräfte zwischen den Papierfasern zurückzuführen. Das leichteste Papier weist mit  $0,47\text{kN/m}$  auch hier die schwächsten Werte auf. Die Proben 280CD ( $1,07\text{kN/m}$ ), 300 CD ( $0,95\text{kN/m}$ ) und 305CD ( $0,99\text{kN/m}$ ) besitzen nahezu identische breitenbezogene Bruchkräfte. 350MD verfügt über eine gesteigerte Bruchkraft von  $1,63\text{kN/m}$  und wird hier nur von dem aufgedoppelten Papier ( $2,25\text{kN/m}$ ) übertroffen, was eine Leistungssteigerung von 483% gegenüber der Einzellage erreicht. Somit hat der Weißleim einen wesentlich größeren Einfluss auf die gesteigerte Bruchkraft in Querrichtung als in Maschinenrichtung. Die Bruchdehnung dieses doppelten Papiers erreicht mit  $7,11\text{mm}$  einen ähnlichen Wert wie die Proben 280CD ( $7,32\text{mm}$ ), 300 CD ( $8,38\text{mm}$ ) und 305CD ( $7,60\text{mm}$ ). Die mit Abstand höchste Bruchdehnung weist die Probe 350CD mit  $11,84\text{mm}$  auf. Grund hierfür scheint die Kombination aus der hohen Grammatur und dem hohen Frischfaseranteil zu sein, bei dem die Bindungskräfte in Querrichtung stärker wirken als bei den Recyclingfasern der anderen untersuchten Papiere.

Zusammenfassend ist zu bemerken, dass die Papiere in Maschinenrichtung relativ ähnliche Bruchkräfte und Bruchdehnungen aufweisen. Die Ergebnisse in Querrichtung zeigen ein wesentlich heterogeneres Feld und bestätigen die vorherigen Annahmen. Im Hinblick auf den Einsatz als leistungsfähiges Decklinerpapier in tragenden Architekturbauteilen aus Wabenplatten eignen sich je nach Sichtweise verschiedene Papiere. Werden ausschließlich die reinen Leistungsdaten betrachtet, so erscheint der Kraftliner mit einer Grammatur von  $350\text{g/m}^2$  als ideales Ausgangsmaterial, da er die höchsten Bruchkräfte aller Papiere aufweist und seine Bruchdehnung im guten Mittelfeld aller Papiere liegt. Nachteilig könnte sich die aufkaschierte PE-Folie auswirken, da diese zwar eine Feuchteresistenz in das Bauteil bringt aber kritisch unter Gesichtspunkten der Nachhaltigkeit zu betrachten ist, da die Folie nicht oder nur mit erhöhtem Aufwand von der Papieroberfläche abzulösen ist.

Wird dieser Aspekt stärker gewertet, so muss auch das Teslinerpapier mit  $305\text{g/m}^2$  entfallen. Die Papiere mit  $280\text{g/m}^2$  und  $300\text{g/m}^2$  bieten gute Leistungsdaten im Vergleich zu den anderen Proben, wobei beide einen hohen bzw. sehr hohen Anteil an Frischfasern aufweisen. Wird beim späteren Einsatz besonderer Wert auf eine gute Umweltbilanz gelegt, so empfiehlt sich das leichteste Papier im Feld. Seine Bruchkraft und -dehnung liegen zwar hinter jenen aller anderen Papiere zurück doch bietet der Altpapieranteil von 100% und das Fehlen einer PE-Kaschierung gute Argumente für einen Einsatz. Auch die weitaus günstigeren Kosten sprechen für dieses Material. Des Weiteren ist zu klären, inwieweit sich die hier ermittelten, sehr unterschiedlichen Kennwerte im späteren Bauteil ablesen lassen und ob sich der materielle Mehraufwand für die Papiere mit besseren Leistungsdaten rechnen würde. Da es sich bei den Wabenplatten um Verbundbauteile handelt, bei denen die Leistungsfähigkeit vor allem von nicht zu Disposition stehenden Kernmaterialien (Wellenstoff) abhängt, ist der Einfluss der Decklinerpapiere auf die endgültige Stabilität genau zu überprüfen.

Im Hinblick auf nachfolgende Testreihen mit konstruktiven Bauteilen aus Wabenplatten kann aus den vorgenannten Gründen keine eindeutige Empfehlung ausgesprochen werden. Liegt der Schwerpunkt der Bewertung eher im ökologisch-nachhaltigen Bereich, sind Platten mit einem Teslinerpapier von  $190\text{g/m}^2$  zu verwenden, da hier das Papier mit der geringsten Grammatur bei einem Recyclinganteil von 100 % zur Anwendung käme. Da die Decklinerpapiere einen großen Einfluss auf die Stabilität der gesamten Wabenplatten haben, ist der Kraftliner mit einer Grammatur von  $280\text{g/m}^2$  vorzuziehen. Er vereint Stabilität, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit in einem ausgewogenen Gesamtpaket.

## 3.2 Forschungsfokus: Wellpappe und Wabenplatten aus Wellpappe

Wie bereits in Kapitel 3.1 am Beispiel der Papiere beschrieben, empfiehlt sich auch bei der Betrachtung von Wellpappe und Wabenplatten eine Beleuchtung des aktuellen Standes der Technik und Forschung, mit getrennter Betrachtung der Materialeigenschaften bei relativer Trockenheit und hoher Umgebungsfeuchte. Durch die Festlegung der Grammaturen von Wellenstoff und Deckliner werden einheitliche Materialspezifikationen getroffen. Dadurch können die Messbereiche der Versuchsreihen eingegrenzt werden, denn die unterschiedliche Leistungsfähigkeit der Wabenplatten liegt nur noch in der Dimensionierung der Bauteile und der Wellenrichtung begründet. Zur Erarbeitung tragfähiger Versuchskonzepte wird auch auf diesem Gebiet eine Literaturrecherche durchgeführt und aufbereitet.

### 3.2.1 Recherche zum Stand von Wissenschaft und Technik

Wabenplatten sind wie auch Wellpappe ein Material mit speziellen richtungsabhängigen, also *orthotropen* Eigenschaften. Sie besitzen gleiche Reaktionen auf Belastungen nach Drehung um 180°, was auf die Orthotropieachsen im Material zurückzuführen ist. Werden Wabenplatten aus Wellpappe wie die SWAP-Elemente betrachtet, so ist zunächst anzumerken, dass hierfür im Gegensatz zu den normalen mehrschichtigen Wellpappen nur einige wenige Veröffentlichungen zugänglich sind. Dies liegt einerseits an der geringen Anzahl an Herstellern dieser Produkte und andererseits in der Unterschiedlichkeit des Kernaufbaus, denn hierbei handelt es sich um Sandwichplatten mit Wellpappen-Kern. Wie in Kapitel 2.5 beschrieben, kann dieser Kern sehr unterschiedlich aufgebaut sein. Honigwabenstrukturen sind dabei am häufigsten anzutreffen. Im Gegensatz zu den Wabenplatten existieren für Wellpappe und vor allem für Transportverpackungen aus diesem Material unzählige Forschungsberichte, welche in bestimmten Fällen für die Arbeit mit Wabenplatten aus Wellpappe adaptiert werden können. Hierbei ist ein großes Forschungsinteresse von Seiten der Wellpappenindustrie erkennbar.

Bereits 1963 veröffentlichte McKee eine Formel zur empirischen Schätzung der Festigkeitswerte von Wellpappe-Boxen. Der *Stapelstauchwiderstand* wird auch als BCT (Box-Compression-Test) bezeichnet und gibt an, welche Kraft eine Box aus Wellpappe aufnehmen kann, ohne einzuknicken. Er wird in Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte und den jeweiligen Materialeigenschaften in kN angegeben. Die Eingangswerte sind der *Kantenstauchwiderstand* (ECT) der Wellpappe (siehe Kapitel 2.3.1), die Biegesteifigkeit in Längs- und Querrichtung, der Umfang der Box ( $U$  in mm) und die Dicke der Wellpappe ( $d$  in mm):

$$BCT = 5,876 \times ECT \times \sqrt{U \times d} \quad (3.1)$$

Die Festigkeitswerte von Boxen aus Wellpappe sind mit dieser Formel schnell zu bestimmen, jedoch sind die Ergebnisse nur als Näherungswerte zu verstehen, da die Eingangswerte die Zusammenhänge nur oberflächlich beschreiben.



In weiterführenden Forschungen werden exaktere Rechenmodelle ermittelt, welche lernende neuronale Netze nutzen.<sup>17</sup> Nachfolgend werden einige wichtige Fachartikel aufgeführt, welche sich der detaillierten Erforschung der Materialeigenschaften von Wellpappe widmen und für diese Arbeit wichtige Impulse gaben.

#### Analyse der Wellenbahnen

Das Verhältnis der Länge des flach liegenden Rohpapiers zur Länge der daraus produzierten Sinus-Wellenbahn wird von Nordstrand in seiner Arbeit *Basic testing and strength design of corrugated board and containers* analysiert. Für fünf Wellenprofile werden jene Faktoren ermittelt, mit denen sich die Länge einer gewellten Bahn zur Länge des ungewellten Rohpapiers verhält. Diese *Take-up factors* hängen von den jeweiligen Wellenlängen und -höhen ab. Sehr kleine F-Wellen mit einer Länge von 2,3 – 2,5mm besitzen einen Faktor von 1,25 während sehr große A-Wellen mit einer Länge von 8,3 – 10,0 Millimetern über einen Faktor von 1,54 verfügen.<sup>18</sup> Nordstrand analysiert ebenfalls, wie sich die Wellen unter bestimmten Lastfällen verändern. Er liefert zahlreiche und detaillierte Untersuchungen zur Querschubsteifigkeit, Knicklastanfälligkeit unter biaxialen Spannungszuständen und bewertet diese parametrisch. Hierbei geht er gesondert auf verschiedene Profilarten (Rundform, V-Form mit gerundeten Ecken, Sinusform und V-Form) ein und bewertet die einzelnen Ergebnisse.<sup>19</sup>

#### Festigkeitseigenschaften von Wellpappe

Bereits im Jahr 1990 untersuchte Urbanik das Kantenstauchverhalten von Wellpappe und schlug einige Verbesserungen der gebräuchlichen Messverfahren vor. Zunächst wird das Knickverhalten von Metallplatten theoretisch mit Formeln untersucht und anschließend für die Anwendung bei Wellpappe adaptiert. Ein Zusammenhang von Knicksteifigkeit der Wellpappe und Druckfestigkeit des Papiers sowie dessen Wellenhöhe wird bewiesen und es wird postuliert, dass die Stabilität der Wellpappe nicht allein von der Stärke des Papiers abhängt. Eine Adaption der vorgestellten Knicktheorie von einwelligen auf mehrwelligen Wellpappen wird als machbar betrachtet.<sup>20</sup>

Daxner und Kollegen analysieren das Knickverhalten einer einwelligen Wellpappe, um Optimierungsvorschläge im Materialverbrauch anbieten zu können. Diverse Berechnungen mit FE-Programmen zeigen das Verhalten der Wellen unter verschiedenen Lasteinflüssen (axial in eine bzw. zwei Richtungen und Rotation) und stellen die Bewegungen im Wellenstoff sehr detailliert dar. Die Forscher unterscheiden dabei einen isotropen und orthotropen Kernaufbau. Ein Schema zur Reduzierung des Gesamtgewichts einer Wellpappe wird dargestellt und führt zu einem Optimierungspotential von 15,5% (isotrop) bis 18,2% (orthotrop).<sup>21</sup>

---

<sup>17</sup>vgl. Schrötter, T.: Funktionsweise von intelligenten Lösungen zur BCT-Wert Berechnung, S. 9ff. [Sch02]

<sup>18</sup>Nordstrand, T.: Basic testing and strength design of corrugated board and containers, S. 2. [Nor03]

<sup>19</sup>ebenda, S. 325. [Nor03]

<sup>20</sup>Urbanik, T. J.: Correcting for instrumentation with corrugated fiberboard edgewise crush test theory, S. 263 ff. [Urb90]

<sup>21</sup>Daxner, T. et al.: Optimum Design of Corrugated Board under Buckling Constraints. [DFR07]

Allaoui und Kollegen untersuchen die unterschiedlichen Belastbarkeiten von Wellpappe in Längs- und Querrichtung. Zahlreiche Zugversuche führen zutage, dass die Belastbarkeit von Wellpappe in Maschinenrichtung MD nahezu doppelt so hoch ist wie in Gegenrichtung CD. Scherversuche und Biegetests bilden die Grundlage für die Entwicklung digitaler Modellierungs-Tools zur Bewertung der Ergebnisse. Weitere Forschungen der Autoren ergeben, dass Wellpappe ein orthotropes Sandwich ist und damit über richtungsabhängige Elastizitätseigenschaften verfügt. Die Testreihen führen zutage, dass das Material in Maschinenrichtung zweimal eher versagt als in Gegenrichtung. Zu Verminderung dieses Problems wird der Ersatz der papiernen Deckflächen durch ein äquivalentes Material vorgeschlagen.<sup>22</sup>

Die Genauigkeit von FE-Methoden zur Vorhersage des Versagens von einwelliger Wellpappe wird von Lu, Chen und Zhu untersucht. Die Autoren unterscheiden zwischen dem *FCT-Test* (Flat Crush Test - einachsiger Druckversuch auf einwellige Wellpappe mit beiden Decklinern) und dem *CMT-Test* (Concorra Medium Test - einachsiger Druckversuch auf einseitige Wellpappe mit nur einem Deckliner). Die Verformung der Wellenbahnen aufgrund der Druckversuche werden gegenübergestellt und mit den rechnerischen Ergebnissen verglichen. Detailliert wird auf Produktionsmängel handelsüblicher Wellpappen und deren negative Auswirkungen auf die Knicksteifigkeit eingegangen.<sup>23</sup>

Das Abkant- und Knickverhalten in Wellpappe wird von Gooren et al. untersucht. Dabei gehen die Autoren besonders auf die gewünschten Knicke in flach faltbaren Kartons ein und stellen Vergleiche zu ungewünschten Knicken auf. Eine spezielle Apparatur ermöglicht die exakte Stauchung der Deckliner und die Messung der Reaktion der Wellpappe. Die Versuche unterscheiden dabei zwischen einwirkenden Kräften gegen den Wellenberg und gegen den Deckliner über einem Wellental. Numerische Simulationen werden parallel durchgeführt und erlauben einen sehr detaillierten Blick auf die Materie.<sup>24</sup>

Die Torsion von Wellpappe unter nichtlinearer Belastung sowie notwendige numerische Rechenmodelle werden von Abbès und Guo untersucht. Ziel ist die Aufstellung einer einheitlichen Rechenmethode. Dies wird durch Zerlegung der Torsionstheorie in zwei berechenbare Drehachsen erreicht, da die Verwindungsraten zwar identisch sind, die entsprechenden Torsionssteifigkeiten aber erheblich abweichen können. Dadurch ist die Berechnung mittels einer einfachen Balkentheorie möglich. Hierbei wird ermittelt, dass die Torsion gegen die Maschinenrichtung CD sehr einfach zu berechnen ist, indem ein Träger aus dünnen Wandelementen mit geschlossenen Zellen angenommen wird. Dadurch ist die Torsion nach der Bredtschen Formel zu berechnen. In Maschinenrichtung MD ist die Torsionssteifigkeit wesentlich komplizierter zu berechnen, doch ist diese im Gegensatz zu CD so klein, dass sie zu vernachlässigen ist.<sup>25</sup>

<sup>22</sup>Allaoui, S. et al.: Elastic behavior of corrugated cardboard: experiments and modeling, S. 53 - 62. [AAB04] siehe auch: [AAB11]

<sup>23</sup>Lu, T. J. et al.: Compressive Behaviour of Corrugated Board Panels.[LCZ01]

<sup>24</sup>Gooren, L. et al.: Experimental and numerical investigation of creasing in corrugated paperboard, 2008. [GTPG08]

<sup>25</sup>Abbès, B. et al.: Analytic homogenization for torsion of orthotropic sandwich plates: Application to corrugated cardboard. [AG10]

Pohl behandelt die Charakterisierung von Sandwichbauteilen mit Kernen aus Papierwaben. Die umfangreiche Arbeit beleuchtet die Produktionsweisen, die Festigkeitseigenschaften sowie die Testmethoden zur Bestimmung derselben. Die sehr detaillierten Ausführungen beginnen bei den Eigenschaften der einzelnen Wellen und münden in Testreihen zur Bestimmung von Druck- und Biegefestigkeiten von Honigwabenplatten. Dabei wird auf imprägnierte und unbehandelte Waben eingegangen. Besondere Aufmerksamkeit widmet die Autorin der Unterscheidung der Produktionsweisen der *Blockmethode* und der *Torhex-Methode*, welche auf ein Patent von K.U. Leuven basiert.<sup>26</sup>

#### **Wirkung von Feuchtigkeit auf Wellpappe**

Allaoui und Kollegen haben in umfangreichen Testreihen auch die Wirkung von verschiedenen Luftfeuchten (35 – 90%) bei gleichbleibender Temperatur (23°C) auf Wellpappe untersucht. Hierbei werden die höheren Festigkeitswerte der Wellpappe in Maschinenrichtung MD mit den schwächeren Festigkeiten der Gegenrichtung CD verglichen. Es wird festgestellt, dass die Belastbarkeit der Wellpappe ab einer relativen Luftfeuchtigkeit von 70% dramatisch abnimmt. Ab 90% verfügt das Material nur noch über die Hälfte der ursprünglichen Belastbarkeit. In Wellenrichtung ist die Schwächung (<30%) nicht so stark ausgeprägt wie in Gegenrichtung (<50%), da die Faserlaufrichtung des Papiers mit der Wellenrichtung korrespondiert. Weitere Untersuchungen führen zutage, dass die Belastungsintensität unter Feuchteinfluss zunächst sehr stark und im weiteren Verlauf wesentlich geringer ansteigt.<sup>27</sup>

Weitere Untersuchungen zum Einfluss von Feuchte auf Wellpappe werden von Hung et al. durchgeführt. Vor dem Hintergrund des großflächigen Einsatzes von Wellpappe als Verpackungsmaterial für Obst und Gemüse werden drei einwellige Wellpappen mit unterschiedlichen Wellenhöhen und Decklinern untersucht. Nach Lagerung bei 23°C und 50% relativer Luftfeuchte werden die Probekörper gewogen und anschließend einer Umgebung von 6°C und 90% relativer Luftfeuchte ausgesetzt, welche über unterschiedlich große Partikelgrößen verfügt. Ein Nano-Nebel mit einer Partikelgröße von Ø 60nm wird hierbei einem Ultraschall-Nebel mit Partikelgrößen von Ø 200nm bis 1250nm gegenübergestellt. Die Feuchtigkeit wird benötigt, um die Ware frisch zu halten, bedroht aber die Stabilität der Wellpappe. Die Adsorptionswerte der Wellpappe werden unter Berücksichtigung der Partikelgröße des Nebels ermittelt. Bei gleichem Feuchtegehalt nehmen die Probekörper unter dem Einfluss von Ultraschall-Nebel eine größere Menge an Wasserpartikeln auf als unter Einfluss des Nano-Nebels und schwächen die Wellpappe somit stärker. Es wird bewiesen, dass die Partikelgröße bei gleichem Feuchtegehalt einen großen Einfluss auf die Stabilitätsbeeinflussung der Wellpappe hat.<sup>28</sup>

---

<sup>26</sup>Pohl, A.: Strengthened corrugated paper honeycomb for application in structural elements, S. 26. [Poh09]

<sup>27</sup>Allaoui, S. et al.: Study of the hygro-mechanical behavior of corrugated cardboard. [AAB05], siehe auch: [AAB09]

<sup>28</sup>Hung, D. et al.: Preserving the strength of corrugated cardboard under high humidity condition using nano-sized mists. [HNT<sup>+</sup>10]

#### Wirkung von Feuer auf Wellpappe

In der Arbeit *Upward flame spread over corrugated cardboard* von Gollner et al. wird das Verhalten von Wellpappe während der Verbrennung untersucht. Das Autorenteam beleuchtet u. a. die Brandgeschwindigkeit und Flammenausbreitung. Es wird festgestellt, dass sich die Flammen aufgrund des inhomogenen Aufbaus der Wellpappe wesentlich langsamer ausbreiten als in anderen Papierbränden oder in einer Lagerfeuer. Tiefergehende Untersuchungen werden angestrebt und sollen unter anderem die Geschwindigkeit der Brandentwicklung und die Größe der Flammenspitzen in unterschiedlichen Wellpappen untersuchen.<sup>29</sup>

Das Brandverhalten von Wellpappe unter verschiedenen Bedingungen ist Thema der Forschung von Chaos et al. Vor dem Hintergrund großer Mengen an Wellpappe in Lagerhäusern wird die Brennbarkeit des Materials untersucht. Dabei werden verschiedene Sauerstoff- und Stickstoffkonzentrationen analysiert. Die Ergebnisse zeigen ein relativ ähnliches Verhalten unter allen getesteten Bedingungen. Parallel durchgeführte Simulationen helfen bei der Bewertung der Ergebnisse.<sup>30</sup>

#### Weiterführende Forschungsansätze

Tian und Lu beschreiben in der Abhandlung *Optimal design of compression corrugated panels* ihre Forschungen zur Gewichtseinsparung bei Wabenplatten im Hinblick auf die Kerngeometrie. Untersucht werden quadratische Kernstrukturen mit durchgängigen und *hutförmigen* Geometrien, dreieckige Kerne mit einer und zwei Decklagen, Trapezformen mit einer und zwei Decklagen sowie vertikale Stege. Nach Analyse des Knickverhaltens der Kerne und rechnerischen Optimierungsprozeduren der acht Kernstrukturen wird festgestellt, dass die dreieckigen Strukturen die schlechtesten Werte aufweisen. Am besten schneiden die hutförmigen Kerne ab, die bei gleicher Belastbarkeit etwa 40% leichter sind als die quadratischen Strukturen. Die Autoren weisen auf das Potential der Gewichtseinsparung in der Wellpappenproduktion mit dreieckigen oder sinusförmigen Kernstrukturen hin.<sup>31</sup>

Ayan analysiert die Anwendbarkeit von Wellpappe als Baumaterial und setzt die Forschungsergebnisse in einen sozio-ökologischen Zusammenhang. Dabei geht sie generell auf die Akzeptanz von Gebäuden aus diesem Material ein und hebt besonders das Bauteil Wand hervor. Die Interaktion des so hergestellten architektonischen Raums wird untersucht und aufgearbeitet. Erkenntnisse über wichtige Eigenschaften der Wellpappe und deren Reaktion auf Umwelteinflüssen vervollständigen die Arbeit.<sup>32</sup>

---

<sup>29</sup>Gollner, M. J. et al.: Upward flame spread over corrugated cardboard. [GWR11]

<sup>30</sup>Chaos, M. et al.: Pyrolysis of corrugated cardboard in inert and oxidative environments, 2013. [CKD13]

<sup>31</sup>Tian, Y. S.; Lu, T. J.: Optimal design of compression corrugated panels. [TL05]

<sup>32</sup>Ayan, Ö.: Cardboard in architectural technology and structural engineering: A conceptual approach to cardboard buildings in architecture, 2009. [Aya09]

### 3.2.2 Untersuchungen von Wabenplatten aus Wellpappe

Wie in Kapitel 3.1.2 erläutert, kommen für die in dieser Arbeit beschriebenen Versuchsreihen die Wabenplatten der Firma SWAP zum Einsatz. Nach Erforschung der Materialkennwerte der zur Verfügung stehenden Papiere wird eine Empfehlung für das Decklinerpapier mit einer Grammatur von  $280\text{g/m}^2$  ausgesprochen. Nun erfolgt die Untersuchung von Wabenplatten mit diesem Deckliner. Bei den Elementen werden zunächst die Materialeigenschaften ohne Feuchteeintrag untersucht, da dieser Zustand für die maximale Leistungsausbeute zwingend erforderlich ist. Die Wabenplatten verlassen das SWAP-Werk mit einem Feuchtegehalt von 7 – 11%. Während ein Feuchteeintrag bei Papieren ein teilweise erwünschter Vorgang (Bedruckung mit flüssigen Tinten) ist, stellt dies bei den Wellpappen einen unerwünschten Zustand dar, da hier keinerlei Vorteile gewonnen werden.

#### Wabenplatten mit einer Stärke von 30mm

In vorhergehenden iterativen Materialstudien wurden mit Platten mit einer Stärke von 30mm die besten Ergebnisse in der Umfaltung und weiteren Bearbeitung erzielt. Dies ist auf das augenscheinlich stimmige Verhältnis von Kerndicke zu Grammatur des Deckliners zurückzuführen. Auch scheint die Steifigkeit der Elemente eine Rolle zu spielen, denn sie sind nicht steif genug, um den gewünschten Umbiegeprozess zu verhindern, bieten diesem jedoch genug Widerstand zur exakten Faltung ohne ein Ausbrechen an der Faltkante.

Versuche mit dünneren Platten führen zu ansehnlichen Faltungen, doch die Stabilität der erzeugten Objekte erfüllen nicht die Anforderungen an ein tragendes Bauteil. Die händische Bearbeitung mit einem handelsüblichen Cuttermesser ist dabei ebenso problemlos möglich wie der Zuschnitt auf der Kreissäge. Die Faltung von dickeren Platten ( $< 30\text{mm}$ ) ist nur noch mit einem nicht mehr im Verhältnis zum Endprodukt stehenden Aufwand zu erreichen und führt auch aus ästhetischen Gesichtspunkten nicht zu den gewünschten Ergebnissen.

#### Wabenplatten mit einer Stärke von 60mm

Durch die intensive Untersuchung der Wabenplatten mit einer Materialstärke von 30mm wird die Erkenntnis gewonnen, dass diese sich nicht für alle Lastfälle in architektonischen Anwendungen eignen und ggf. höhere Materialstärken benötigt würden. Die Dicke von 60mm wird in iterativen Materialstudien ermittelt und richtet sich nach den Schnitt-Tiefen der zur Verfügung stehenden Maschinen sowie der Handhabbarkeit der Platten für eine Person. Die einfache Aufdopplung der Platten wird verworfen, da der Lieferant Materialstärken von 5 – 80mm liefern kann und der Einsatz großer Mengen Klebstoffes zu vermeiden ist. Denkbare Einsatzgebiete im architektonischen Kontext sind:

- Konstruktion des Fußbodens als belastbare und schwingungsfreie Lauffläche
- Aufbau der Decke durch Sammlung und Verteilung vertikaler Lasten
- Einsatz als Wärmedämmung im Fassadenbereich

#### 3.2.3 Druckfestigkeit

Um die einachsige Belastbarkeit von Bauteilen zu bestimmen, werden Druckversuche unter Laborbedingungen durchgeführt. Hierbei kommen Prüfgeräte zum Einsatz, welche den Probekörper zwischen zwei Drucktellern mit selbstständiger Parallelstellung einachsig belasten. Wabenplatten aus Wellpappe verfügen über unterschiedliche Druckfestigkeiten in ihren drei Achsen. In dieser Versuchsreihe werden diese drei Werte durch Belastung der Probekörper vertikal zur Deckfläche, stirnseitig in Wellenrichtung und stirnseitig gegen die Wellenrichtung ermittelt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die beiden letztgenannten einer direkten Belastung in die offenen Stirnseiten unterzogen werden, da auch die später getesteten Bauteile keine lastverteilenden Deckpapiere an ihren Stirnseiten besitzen. Diese Kennwerte sind für zukünftige Anwendungen von großer Bedeutung, da die späteren Bauteile aus Wabenplatten gefaltet und die innere Struktur somit unterschiedlichen Lastfällen ausgesetzt werden. Ziel ist die Kenntnis der richtungsabhängigen Druckfestigkeiten einer Wabenplatte, um diese durch Faltung bestmöglich im Sinne der zu erwartenden Lastfälle einzusetzen.

Vor Beginn der Testreihen werden die Druckfestigkeiten in den drei Achsen theoretisch evaluiert. Postuliert werden drei Vermutungen:

- Die Wabenplatten besitzen die mit Abstand höchste Druckfestigkeit bei einer vertikalen Belastung gegen den Deckliner, da sie in diese Richtung den größten Anteil gegeneinander ausgesteifter Papierflächen besitzen. Hierbei ist von einer Abnahme der Druckbelastbarkeit bei steigender Materialstärke auszugehen, da die Knicklängen der gegen die Druckkraft wirkenden Papierwellen zunehmen.
- Eine ebenfalls hohe, wenn auch nicht so überragende Belastbarkeit, wird bei stirnseitiger Lasteinleitung in Wellenrichtung vermutet, da hier ebenfalls parallel zueinander verlaufende Papierlagen vorhanden sind. Davon werden jedoch nur 50% statisch aktiv. Die restlichen Lagen liegen als Welle vor und bieten keinen Widerstand gegen die einwirkenden Kräfte.
- Eine stirnseitige Belastung quer zur Wellenrichtung lässt die schwächsten Werte erwarten, da die Probekörper hier lediglich übereinander gestapelte Sinuswellen im Wechsel mit liegenden Zwischenlagen aufweisen. Diese werden nach und nach zusammengedrückt, bis sämtliche Hohlräume verschwunden sind.

#### Material und Methoden

Die hier beschriebenen Druckversuche können als Analogie zum *Flachstauchwiderstand* von Papieren gesehen werden. Er gibt an, welchen Widerstand eine einwellige Wellpappe einer senkrecht einwirkenden Kraft entgegenbringt. Im Fall der Wabenplatten sind diese Grundannahmen ähnlich gelagert, doch sind hier die Wellen um 90° gedreht. Für die nachfolgend beschriebenen Versuchsreihen werden ähnlich gelagerte Messergebnisse erwartet, da sich die Probekörper bei gleicher Grundfläche nur durch ihre Dicke sowie die vorhandenen oder nicht vorhandenen horizontalen Papierlagen unterscheiden.

Zwei Testreihen werden durch Herstellung von Proben in den oben genannten Materialstärken vorbereitet. Um Einzelfehler zu vermeiden und belastbare Werte zu generieren, wird eine Anzahl von fünf Probekörpern pro Druckversuch festgelegt. Diese werden 24 Stunden vor der Versuchsreihe im Labor gelagert, damit sich diese an die herrschenden konstanten Umweltbedingungen (Temperatur: 21,6° C, Luftfeuchte: 34,6%) angleichen. Das Prüfgerät<sup>33</sup> verfügt über zwei Druckplatten mit einem Durchmesser von 200mm, welche die Probekörper großzügig überlappen. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 0,1mm/s.

Nach Generierung aller Datensätze werden die Ergebnisse zur Ermittlung der geometrischen Mittelwerte in eine Excel-Tabelle eingepflegt. Da die verwendeten Probekörper durch ihre Materialstärken über unterschiedliche Auflageflächen verfügen, werden die Ergebnisse interpoliert und in kN/m<sup>2</sup> ausgegeben. Die dargestellten Kurven und die angegebenen Werte bilden diese Interpolation ab. Nachfolgend sind die Testreihen aufgeführt:

#### 1. Vertikale Belastung gegen den Deckliner

Eine vollflächige Belastung wird an vier verschiedenen Typen mit den grundlegenden Abmessungen von 100 x 100mm durchgeführt, was einer Auflagefläche von 10.000mm<sup>2</sup> (0,01m<sup>2</sup>) entspricht. Dabei wird zwischen Probekörpern mit Kaschierung (30K und 60K) und ohne Kaschierung (60UK) unterschieden. Da beim späteren Versuchsbau miteinander verleimte Bauteile zum Einsatz kommen, sind zusätzlich 60mm starke Probekörper aus zwei aufeinander geleimten Platten mit jeweils 30mm zu erstellen (2x30K). Zur Evaluierung der Unterschiede kommen vier Typen zum Einsatz:

- kaschierte Wabenplatte, 30mm (30K), L: 100mm, B: 100mm
- kaschierte Wabenplatte, 60mm (60K), L: 100mm, B: 100mm
- doppelte kaschierte Wabenplatte, 60mm (2x30K), L: 100mm, B: 100mm
- unkaschierte Wabenplatte, 60mm (60UK), L: 100mm, B: 100mm

#### 2. Stirnseitige Belastung in Wellenrichtung

Zur Ermittlung der Druckfestigkeit der Wabenplatten in Wellenrichtung (W) werden fünf Probekörper aus einer Wabenplatte mit einer Stärke von 30mm erstellt. Die geometrischen Mittelwerte der Druckfestigkeiten in Wellenrichtung sollen mit jenen gegen die Wellenrichtung verglichen werden. Um diese Werte stichhaltig verifizieren zu können, werden weitere fünf Probekörper mit der doppelten Stärke von 60mm druckbelastet. Die beiden Typen in Wellenrichtung (W) und ihre Bezeichnung sind:

- Probekörper in Wellenrichtung, 30mm (30W), B: 100mm
- Probekörper in Wellenrichtung, 60mm (60W), B: 100mm

---

<sup>33</sup>Prüfmaschine: walter+bai, LFM 250/20 kn mit Kraftmessdose GTM, Serie K, 250kN

#### 3. Stirnseitige Belastung gegen die Wellenrichtung

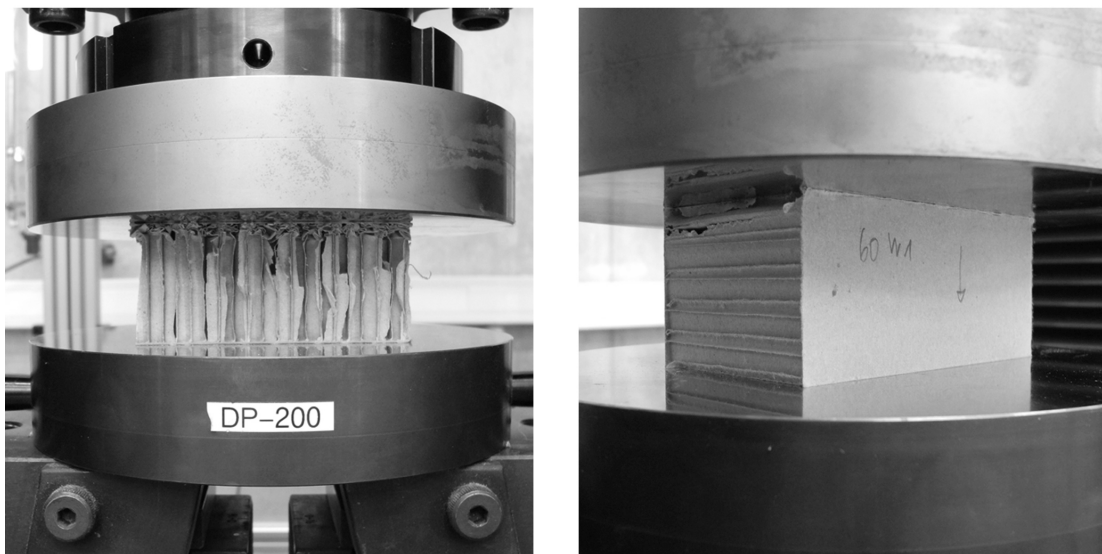
Analog zur Versuchsreihe 2 werden auch gegen die Wellenrichtung (GW) fünf Probekörper (30mm) abgedrückt. Auch hier erfolgt die Gegenprobe mit weiteren fünf Testobjekten mit einer Stärke von 60mm. Die Abmessungen der Probekörper entsprechen jenen von Versuchsreihe 2.

- Probekörper in Wellenrichtung, 30mm (30GW), B: 100mm
- Probekörper in Wellenrichtung, 60mm (60GW), B: 100mm

#### Durchführung

Für alle drei Versuchsreihen werden die Materialproben jeweils nacheinander zentral auf dem unteren Druckteller des Prüfgeräts platziert und einzeln belastet. Die obere Druckplatte wird hierfür bis zur Berührung mit dem Probekörper herabgefahren und anschließend wird die automatische Prüfsequenz gestartet. Nach Eingabe der Messergebnisse in eine Excel-Tabelle erfolgt die grafische Ausgabe in einem Spannungs-Stauchungs-Diagramm. Analog zum Zugversuch beschreibt die x-Achse den zurückgelegten Fahrweg des Druckprüfgeräts und die y-Achse zeigt die Druckkraft in kN.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Versuchsreihen 1–3 beschrieben. Eine anschließende Bewertung der Druckbelastbarkeiten macht eine Vergleichbarkeit in den drei Achsen der Wabenplatten möglich. Abbildung 3.4 zeigt links die kontinuierliche Stauchung eines Probekörpers in vertikaler Richtung zum Deckliner. Das Foto rechts dokumentiert die Verformung der Probe durch stirnseitige Lasteinwirkung.

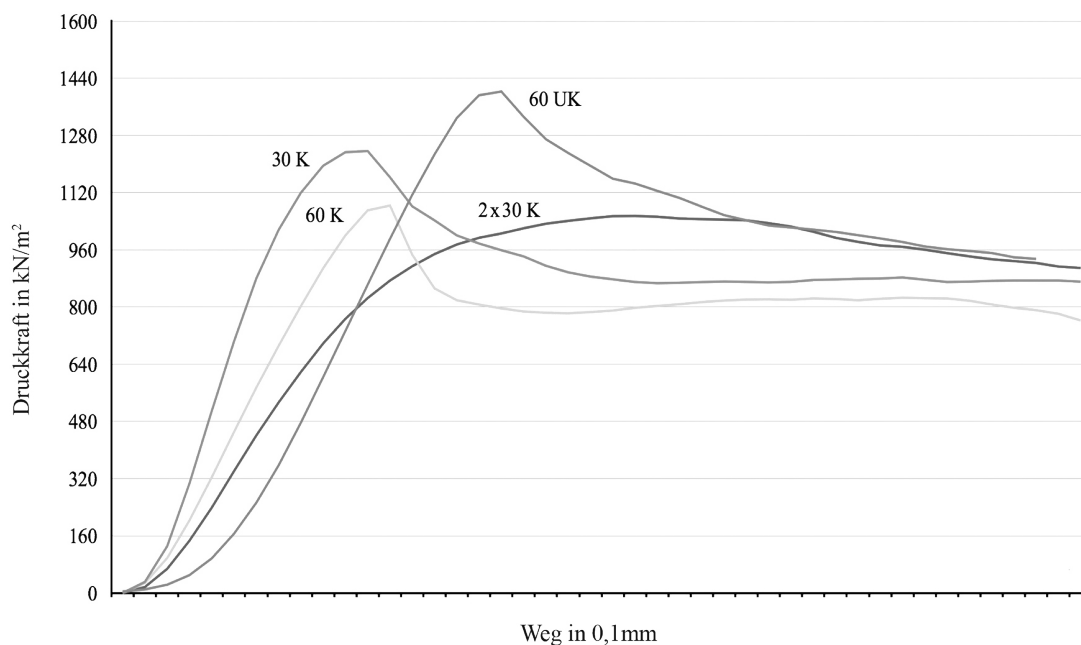


**Abbildung 3.4:** Vertikale Belastung zum Deckliner (links) und zur Stirnseite (rechts)



### Ergebnisse aus Versuchsreihe 1

In der ersten Versuchsreihe können alle vier gewünschten Wertereihen ermittelt werden. Abbildung 3.5 zeigt die Kurvenverläufe der geometrischen Mittelwerte aller Proben.

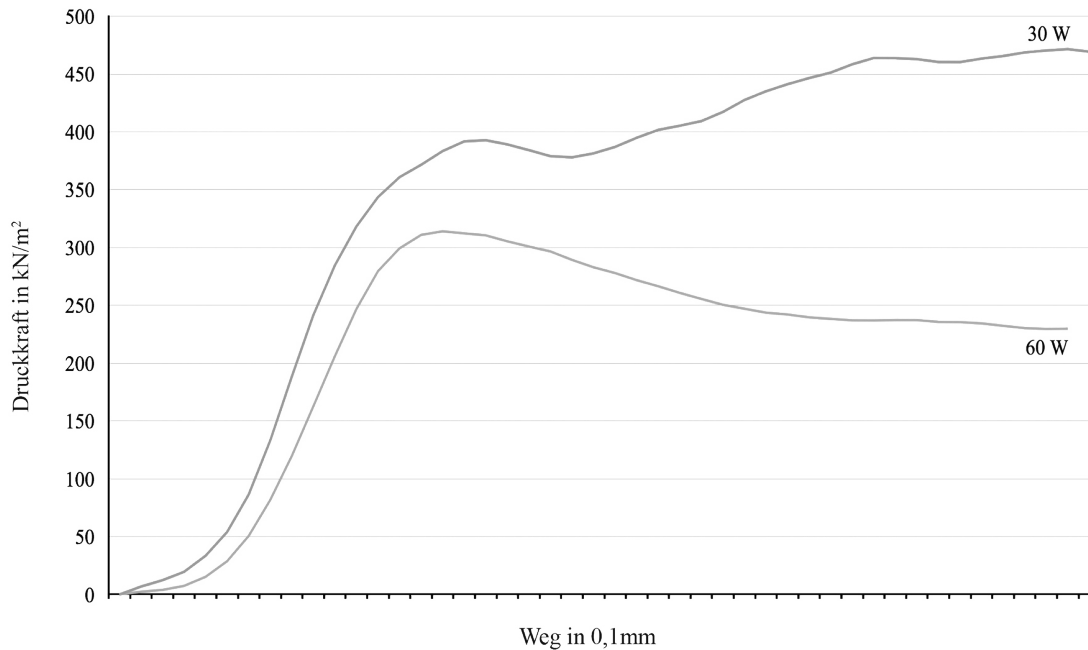


**Abbildung 3.5:** Druckversuch vertikal zum Deckliner

Bis auf die Probe 2x30K zeigen alle Verläufe einen linearen Anstieg bis zum Versagen. Hierbei erreicht die Probenreihe 60K mit  $1084 \text{ kN/m}^2$  erwartungsgemäß den niedrigsten Wert und bestätigt die vorhergehende Annahme, dass die dickere Wabenplatte wegen der höheren Knicklängen weniger belastbar ist. Mit  $1237 \text{ kN/m}^2$  verfügt die Probenreihe 30K über eine um 14,1% höhere Druckbelastbarkeit gegenüber der doppelt so dicken Probenreihe 60K. Interessanterweise erreicht die Probe 60UK ohne Decklinerpapier mit  $1403 \text{ kN/m}^2$  den höchsten Wert der Reihe. Hierbei ist zu vermuten, dass die plane Metalldruckplatte direkt an den inneren Wellenpapieren anliegt und an deren Enden für extrem kleine Stauchungen (Puffer) sorgt, bis die Kraft über die gesamte Fläche des Probekörpers abgeleitet wird. Im Gegensatz dazu scheint die Papierlage bei den Proben mit Deckliner für eine direkte Krafteinleitung zu sorgen, was zu einem früheren Versagen führt. Im Gegensatz dazu zeigt die aufgedoppelte Probe 2x30K keinen eindeutig ablesbaren Punkt des Versagens, sondern einen gleichmäßig geschwungenen Kurvenverlauf bis zu einem Maximalwert von  $1055 \text{ kN/m}^2$ .

### Ergebnisse aus Versuchsreihe 2

Die zweite Versuchsreihe widmet sich der Druckbelastbarkeit in Wellenrichtung der Wabenplatte. In Abbildung 3.6 ist zunächst ein gleichmäßig ansteigender Kurvenverlauf beider Testreihen bis zum Versagen zu erkennen. Der Versagensfall zeigt sich jedoch nicht als spitzer Ausschlag in der Kurve, sondern markiert einen langsamen Abfall der Druckbelastbarkeit beider Proben.

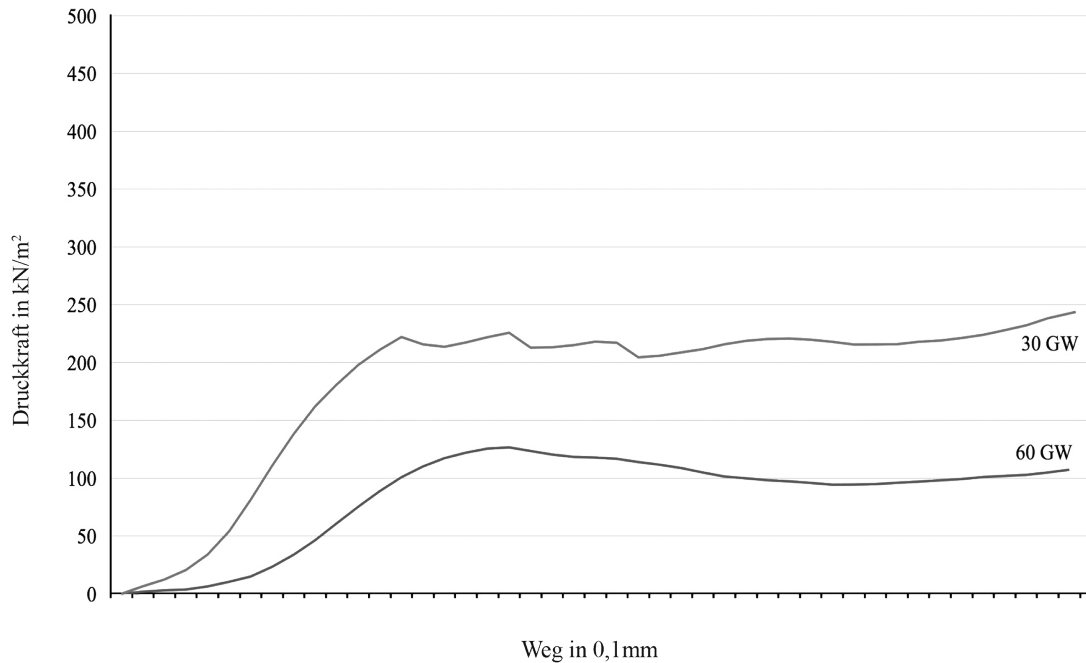


**Abbildung 3.6:** Druckversuch stirnseitig in Wellenrichtung

Gemäß den Vorüberlegungen müssten beide Kurven einen ähnlichen Verlauf aufweisen. Zu erkennen ist jedoch, dass die dünnere Probe 30W mit  $472\text{kN/m}^2$  im Verhältnis eine höhere Druckbelastbarkeit aufweist als der doppelt so starke zweite Probekörper 60W mit  $314\text{kN/m}^2$ . Auch ist bei 30W im weiteren Verlauf der leichte Anstieg der Druckbelastbarkeit zu erkennen, während diese bei 60W stetig abnimmt. Dies ist auf die beiden außen liegenden Deckliner zurückzuführen, welche ebenfalls gegen die Druckkräfte arbeiten. Der Widerstand der Deckliner ist bei Probe 30W größer, da sie über eine wesentlich geringerer Grundfläche verfügt und somit der Einfluss der äußeren Deckliner stärker wirkt. Dies führt einerseits zu den erhöhten Druckfestigkeitswerten und andererseits zum weiteren Anstieg im späteren Kurvenverlauf.

### Ergebnisse aus Versuchsreihe 3

Der dritte und letzte Druckversuch beleuchtet die Druckkräfte gegen die Wellenrichtung. Abbildung 3.7 zeigt die Kurvenverläufe der Probekörper 30GW und 60GW.



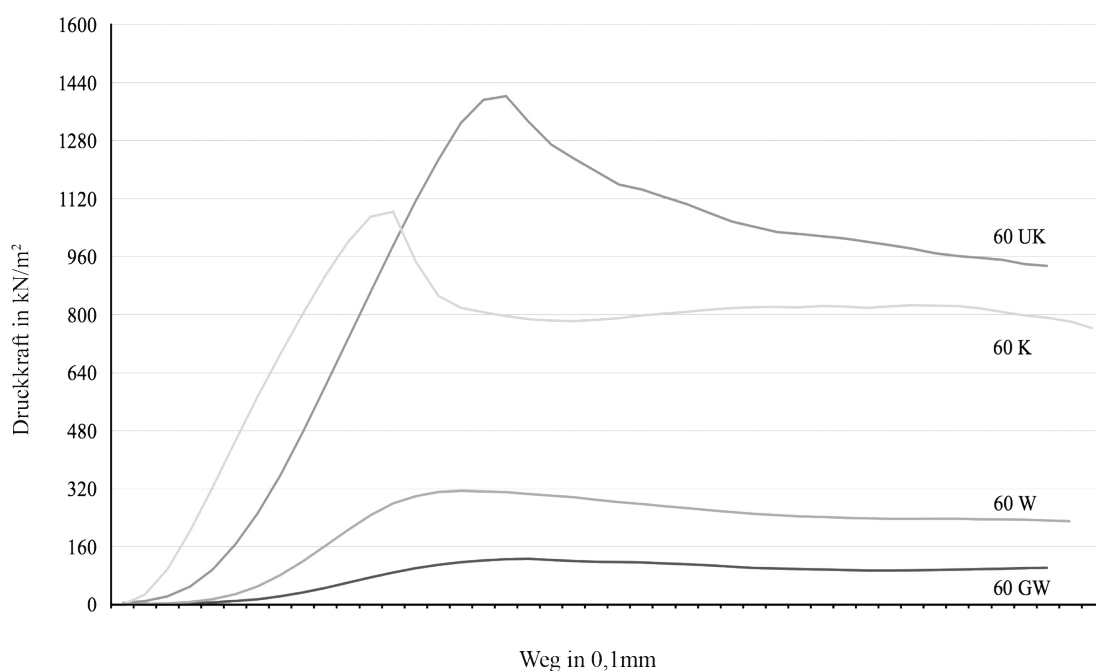
**Abbildung 3.7:** Druckversuch stirnseitig gegen die Wellenrichtung

Beide Kurven verfügen zunächst ebenfalls über einen gleichmäßigen Anstieg sowie eine wesentlich höhere Druckfestigkeit der schmalen Probe mit  $222\text{kN/m}^2$  gegenüber der stärkeren mit  $140\text{kN/m}^2$ , was mit dem Einfluss des Deckliners zu erklären ist. Besonders bei Probe 30GW ist die innere Struktur der Wabenplatten abzulesen und in Form einer Wellenlinie im hinteren Kurvenverlauf erkennbar, da bei dem Druckversuch die einzelnen Wellenkammern nach und nach zusammengestaucht werden. Diese Stauchung führt zu einem immer wieder ansteigenden und abfallenden Widerstand der einzelnen Segmente. Die interpolierte Kurve 60GW hat in etwa den gleichen Verlauf, lässt diese Wellenlinie aber nicht erkennen. Werden die Einzelkurven aller GW-Proben betrachtet so sind die Wellenlinien jederzeit deutlich sichtbar. Die Interpolation scheint die Wellenspitzen durch den zeitlichen Versatz ihres Auftretens in bestimmten Fällen abzurunden. Dies hat jedoch keinen Einfluss auf den Gesamtverlauf der Kurve und die Wiedergabe des Testergebnisses.

### Schlussfolgerungen

Bestätigt werden die Annahmen, dass die Wabenplatten die größte Druckfestigkeit bei einer Belastung vertikal zum Deckliner besitzen, gefolgt von der Belastbarkeit in stirnseitiger Wellenrichtung. Die schwächsten Werte zeigt erwartungsgemäß die Belastung in Gegenwelle. Besondere Beachtung ist hierbei dem Umstand zu widmen, dass die unka-schierte Wabenplatte bei vertikaler Belastung über die höchste Druckfestigkeit verfügt. Dies wird bei Bauteilen interessant, welche als Sandwichelemente ausgeführt werden und über stabilere Deckschichten als die zum Einsatz gekommenen Papierlagen verfügen.

Um die Zusammenhänge zu verdeutlichen, werden die Kurven der Probereihen 60W, 60GW, 60K und 60UK in Abbildung 3.8 zusammengefasst. Zu begründen ist dies mit dem Versuch, die schwächeren der ermittelten Werte gegenüberzustellen.



**Abbildung 3.8:** Druckversuche 1 – 3 im Vergleich

Da die dickeren Platten durch den abnehmenden Einfluss des Deckliners über geringere Druckfestigkeitswerte als die dünneren Platten verfügen, werden die Probekörper mit der Stärke 60mm für diesen Vergleich ausgewählt. Deutlich ist der Unterschied zwischen vertikaler und stirnseitiger Belastung zu erkennen.

Im Hinblick auf vertikale Tragelemente wie gefaltete Stützen oder Wandbauteile rücken die Werte der Proben in Wellenrichtung in den Fokus, da die Platten hier ihre größte Längenausdehnung von 3,13 Metern besitzen. Die schwachen Werte in Querrichtung sind hierbei zu vernachlässigen, da die untersuchten Bauteile in diese Richtung umgefaltet und dadurch stabilisiert werden.

Es ist zu berücksichtigen, dass der Deckliner auf dünnere Platten einen wesentlich größeren statischen Einfluss hat als auf stärkere Elemente. Während das Fehlen von Decklinerpapieren positive Auswirkungen auf die Druckfestigkeit vertikal zur Plattenoberfläche zu haben scheint, werden die Papiere bei stirnseitiger Belastung aktiv und ertüchtigen die Kernstruktur nicht unerheblich. Je geringer die Materialbreite ausfällt, je größer ist der positive Einfluss der Deckliner. Dieser kann bei Auswahl noch höherer Grammaturen nochmals gesteigert werden. Sein Einfluss nimmt wieder ab, je länger das Bauteil dimensioniert wird, weil sich dadurch die Knicklänge erhöht.

Zusammenfassend wird gefolgert, dass die Druckfestigkeiten der Wabenplatten zwar einen wichtigen Einfluss auf die spätere Leistungsfähigkeit der Bauteile haben, dass der große Unterschied zwischen den Werten in vertikaler oder stirnseitiger Richtung jedoch in Abhängigkeit vom späteren Einsatzgebiet zu bewerten sind. Dies ist einerseits auf die Kombination der Platten durch Verbindung mittels Klebstoffen zurückzuführen und andererseits auf den Umstand, dass die zur Untersuchung gekommenen Elemente teilweise mehrfach gefaltet werden. Dies führt zu wesentlich komplexeren Geometrien und dadurch zu weiteren Belastungsversuchen ganzer Bauteile. Hier hängt die Leistungsfähigkeit weniger von den Einzeldaten als vielmehr von der logischen Kombination der vorteilhaften Eigenschaften in Lastrichtung ab.

### 3.2.4 Biegesteifigkeit

Die in der Forschungsarbeit untersuchten Wabenplatten aus Wellpappe werden sehr ausführlich auf ihre Druckbelastbarkeit in alle drei Achsen untersucht und bewertet. Für eine ganzheitliche Evaluierung der Elemente reichen diese Werte jedoch nicht aus, da im architektonischen Kontext auch Biegebeanspruchungen auftreten würden. Hierbei muss zwischen der Lastabtragung in der Wabenplatte in Wellenrichtung und in Querrichtung unterschieden werden. Wie in allen anderen Testreihen auch, liegt der Fokus auf Probekörpern mit einer Stärke von 30mm und 60mm. Schon bei der optischen Begutachtung und händischen Untersuchung der Wabenplatten lassen sich verschiedene Eigenschaften abschätzen, die in nachgelagerten Versuchsreihen zu beweisen oder zu widerlegen sind. Folgende Punkte werden postuliert:

- Verhältnis von Wellenrichtung zur Querrichtung  
Zunächst wird die Behauptung aufgestellt, dass die Probekörper in Wellenrichtung über eine größere Biegesteifigkeit verfügen müssen, da hier die Anzahl gegenseitig ausgesteifter Wellenbahnen wesentlich höher als in Querrichtung ist. Händische Biegeversuche mit dem Ziel des Verbiegens der Wabenplatte führten zu dem Ergebnis, dass in Wellenrichtung eine wesentlich größere Kraft aufgebracht werden muss.
- Einfluss der Materialstärke  
Weiterhin wird der logische Schluss formuliert, dass die dickeren Platten über eine größere Biegesteifigkeit verfügen werden als die dünneren. Zu hinterfragen ist, ob sich die doppelte Materialstärke auch in doppelt so hohen Werten der Biegesteifigkeit manifestiert oder ob Abstufungen auszumachen sind.
- Einfluss des Deckliners  
Durch die gesammelten Erfahrungen mit dem Material und den Testergebnissen der verwendeten Papiersorten wird außerdem postuliert, dass die Deckliner einen sehr großen Einfluss auf die Steifigkeit der Wabenplatten haben würden. Dies zeigt sich schon allein in der Tatsache, dass Probekörper ohne Deckliner in Querrichtung mit einem sehr geringen Kraftaufwand per Hand verbogen werden können. In Längsrichtung ist die aufzubringende Kraft zwar höher, doch konnte die Probe auch hier mit reiner Handkraft aus ihrer flächigen Form gebracht werden. Grund hierfür sind die geringen Bindungskräfte zwischen den einzelnen Wellenbahnen und das Fehlen kraftableitender Deckpapiere. Somit verfügen die Waben ohne Deckliner über die höchste Druckbelastbarkeit, im Gegensatz dazu jedoch über die geringste Biegesteifigkeit. Dies führt zur Erkenntnis, dass bei den Biegeversuchen ausschließlich Wabenplatten mit Kaschierung zu untersuchen sind.

Hinsichtlich der nachfolgend beschriebenen Biegeversuche ist hervorzuheben, dass diese nicht durchgeführt werden, um detaillierte Materialkennwerte aller Wabenplatten zu erhalten. Dies ist nur in einer groß angelegten Testreihe mit wesentlich mehr Probekörpern und unter erheblichem Aufwand zu leisten. Hierbei wären neben unterschiedlichen Materialstärken auch die unterschiedlichen Deckliner zu berücksichtigen.

Da die Wabenplatten durch Faltung in ihrer Struktur verändert werden und auch das Decklinerpapier schon festgelegt ist, haben die Testreihen vielmehr das Ziel, eine Vergleichbarkeit der Biegesteifigkeit in und gegen die Wellenrichtung herzustellen. Somit können mit einem überschaubaren Aufwand wertvolle Informationen zu dem Material und den zu erwartenden Eigenschaften gewonnen werden.

#### Material und Methoden

Zur Ermittlung der Biegesteifigkeit stehen mehrere Methoden zur Verfügung, welche mit unterschiedlichen Prüfeinrichtungen durchzuführen sind.<sup>34</sup> Die Größe der Probekörper richtet sich dabei nach den Spezifikationen des Prüfgeräts. Unterschieden werden Zwei-, Drei- und Vierpunkt-Verfahren durch die Anzahl der Punkte, an denen das Probestück entweder befestigt oder belastet wird. Die Biegesteifigkeit wird *breitenbezogen* ermittelt und richtet sich nach den Dimensionen des Probestücks und dem Abstand von Auflager zu Kraftangriffspunkt. Die drei Verfahren zur Bestimmung der Biegesteifigkeit werden in DIN 53121 folgendermaßen definiert:<sup>35</sup>

- Das Zweipunkt-Verfahren beansprucht die an einem Ende fest eingespannte Probe “... durch eine senkrecht zur Probenoberfläche wirkende Kraft  $F$  ...”.
- Das Dreipunkt-Verfahren bietet dem Probestück zwei Auflagerpunkte und eine mittig dazwischen wirkende, senkrechte Kraft.
- Das Vierpunkt-Verfahren erweitert diese Versuchsanordnung um einen weiteren Kraftangriffspunkt, denn die “... balkenförmige Probe wird durch zwei symmetrisch zwischen diesen Auflagern wirkende Einzelkräfte beansprucht.”

Im Vorwort der DIN 53121 vom Oktober 2008 wird festgestellt, dass bei der Überprüfung von Wellpappe das Vierpunkt-Verfahren anzuwenden ist, um die maximale Aufwölbung der Probe exakt ausmessen zu können. Da bei den untersuchten Wabenplatten weniger die materialeigenen Kennwerte als vielmehr eine Vergleichbarkeit der Proben in den unterschiedlichen Richtungen im Mittelpunkt steht, wird statt dem aufwändigeren Vierpunkt-Verfahren das Dreipunkt-Verfahren angewendet. Hierbei ist auch zu hinterfragen, ob der für Wellpappe definierte Verfahrensablauf exakt auf die Wabenplatten übertragbar ist. Wie in Kapitel 2.5 beschrieben, verfügen diese in ihrem Grundaufbau zwar über Wellpappen-Kerne, doch sind diese gegenüber einer normalen Wellpappe gänzlich anders ausgerichtet und wesentlich homogener im Aufbau. Da die Wabenplatte als Sandwich-Struktur zu definieren ist, kommt der Dreipunkt-Versuch zur Anwendung. Hinzuzufügen ist, dass dieses Verfahren das Umfalten einer Wabenplatte an einer definierten Achse besser abbildet und somit gegenüber den anderen Methoden vorzuziehen ist. Die gewonnenen Ergebnisse lassen die gewünschte Vergleichbarkeit zu, was an den gemeinsam dargestellten Kurvenverläufen gut abzulesen ist.

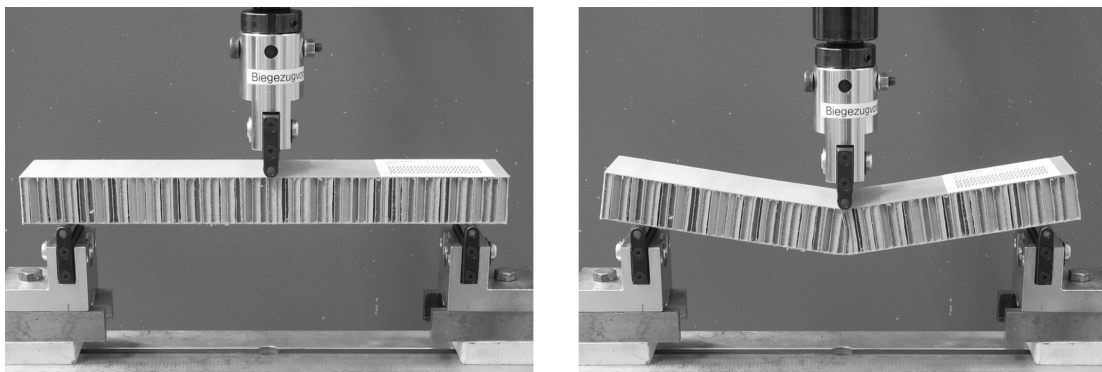
<sup>34</sup>In DIN 53121 sind drei Verfahren erläutert, die eine vertikale Belastung des balkenförmigen Probekörpers mit einer gleichbleibenden Geschwindigkeit vorsehen.

<sup>35</sup>DIN 53121: Prüfung von Papier, Karton und Pappe - Bestimmung der Biegesteifigkeit nach der Balkenmethode, Oktober 2008, S. 5ff. [DIN08]

#### Durchführung

Zur vergleichenden Ermittlung der Biegesteifigkeit mittels Dreipunkt-Verfahren werden Probekörper aus Wabenplatten (Deckliner:  $280\text{g/m}^2$ ) mit einer Breite von 50mm hergestellt. Zu ermitteln sind die Werte für Platten mit einer Stärke von 30mm und 60mm in Wellen- und Querrichtung. Die Kurzbezeichnung der Probekörper gibt die Plattendicke in Millimetern und die Ausrichtung des Prüfungsvorgangs an.<sup>36</sup>

Es werden weitere Probestücke mit einer Dicke von 15mm erstellt, um aufzuklären, ob sich die Biegesteifigkeit proportional zur Plattendicke ändert. Pro Durchgang kommen jeweils drei Probekörper zum Einsatz, was zu einer Gesamtprobenzahl von 18 Exemplaren führt. Diese werden 24 Stunden vor Beginn der Versuchsreihe im Prüflabor gelagert, um eine Anpassung an die dortigen Umweltbedingungen zu erreichen.<sup>37</sup> Die unteren beiden Auflager des Prüfgeräts<sup>38</sup> sind Rollen mit einem Durchmesser von 10mm und verfügen über einen Abstand von 510mm. Mit einer Prüfungsgeschwindigkeit von  $0,5\text{mm/s}$  verformt eine herabfahrende Rolle mit einem Durchmesser von 10mm die Wabenplatte.



**Abbildung 3.9:** Biegeversuch an einem Probekörper mit einer Dicke von 30mm

Die Datenabfrage des Prüfgeräts erfolgt in einem Intervall von 0,5s und ermittelt die einwirkende Kraft in kN. Die Daten werden in einer Excel-Tabelle gesammelt und pro Art der Probe erfolgt die automatische Berechnung des Mittelwertes. Alle Probekörper werden nacheinander auf den Auflagerpunkten des Prüfgeräts platziert und die Rolle des oberen Druckzylinders wird bis zum Kontakt mit dem Deckliner herabgefahren. Anschließend wird die Prüfsequenz gestartet und nach einem Fahrweg von 25mm abgebrochen, da ab hier keine sichtbare Veränderung des Kurvenverlaufes auszumachen ist. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt in einem Spannungs-Stauchungs-Diagramm.

<sup>36</sup>Das Beispiel 30W steht hierbei für einen Probekörper mit einer Dicke von 30mm und einer Ausrichtung desselben in Wellenrichtung. 60GW bildet einen doppelt so dicken Probekörper mit einer Prüfung gegen die Wellenrichtung ab.

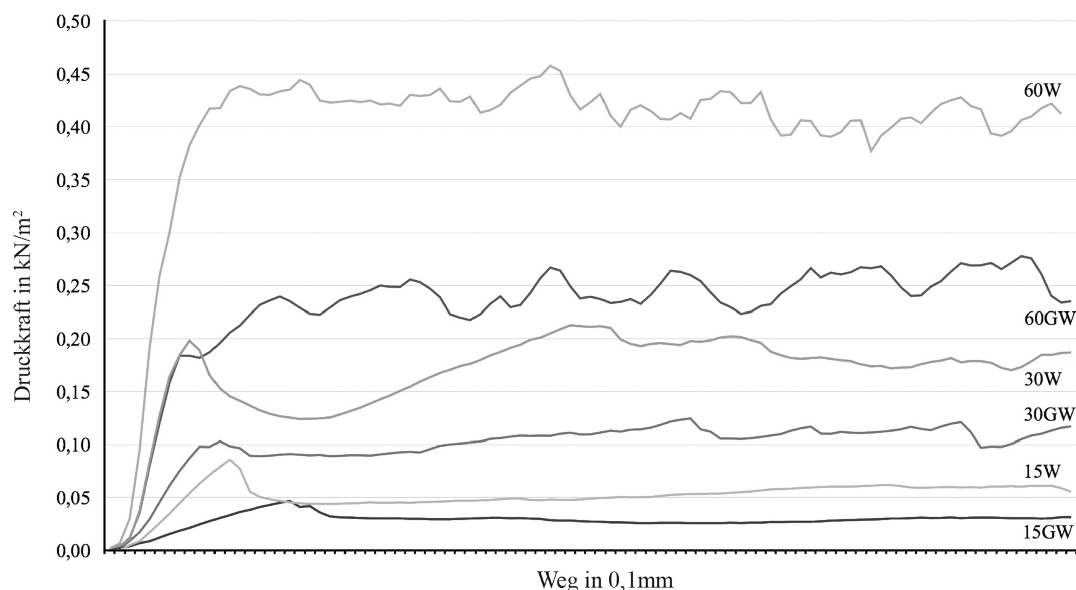
<sup>37</sup>Temperatur:  $18,9^\circ\text{C}$ , Luftfeuchte: 33,4%

<sup>38</sup>Prüfmaschine: walter+bai, LFM 250/20 kn mit Kraftmessdose GTM, Serie K, 20kN



### Ergebnisse

Die Biegeversuche können ohne Einschränkungen durchgeführt werden. Abbildung 3.10 zeigt die Mittelwerte aller Ergebnisse der durchgeführten Versuche. Die grundlegenden Erwartungen, dass die dickeren Proben höhere Biegesteifigkeiten als die dünneren aufweisen, werden ebenso erfüllt wie die Annahme, dass die Werte in Wellenrichtung höher ausfallen würden als in Querrichtung. Die Kurvenverläufe weisen eine typische Form mit einem anfangs geradlinigen Anstieg aller Graphen auf. Dieser Anstieg ist umso steiler und wird umso eher erreicht, je höher die Biegebelastbarkeit des Probekörpers ausfällt.



**Abbildung 3.10:** Biegeversuche in Wellenrichtung (W) und in Querrichtung (GW)

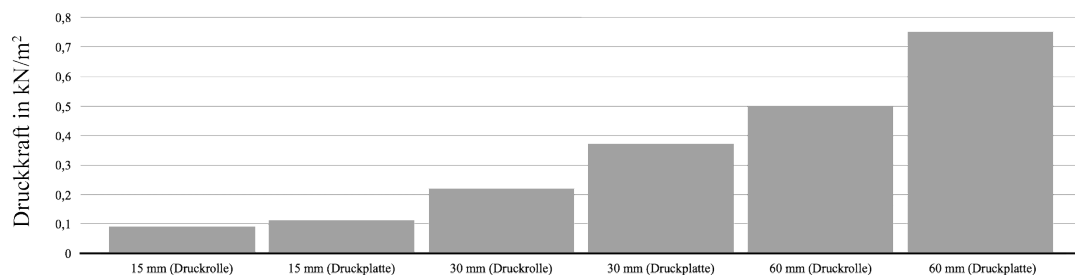
Nach Erreichen des Höchstwertes verlaufen alle Kurven bei konstanter Krafteinwirkung mit geradliniger Tendenz weiter, was darauf schließen lässt, dass die Proben dem Prüfstempel keinen Widerstand mehr entgegenbringen und die Wabenplatte nach und nach gestaucht wird. Die unregelmäßigen Ausschläge in den Graphen der GW-Proben sind auf das inhomogene Kernmaterial zurückzuführen, welches abschnittsweise von Papierlage zu Papierlage oder von Welle zu Welle gestaucht wird. Dieses Phänomen ist auch bei den Druckversuchen zu beobachten.

In Wellenrichtung wie auch in Querrichtung wechseln sich Bereiche mit aussteifenden Papierlagen mit dazwischen liegenden Hohlräumen ab und führen zur Ausbildung von Graphen in Zickzack-Form. Diese Eigenschaft nimmt bei stärkeren Proben zu, da hier mehr Wellenlagen zur Erhaltung der Biegesteifigkeit beitragen.

### Schlussfolgerungen

Die Testreihen zeigen, dass eine Erhöhung der Biegebelastbarkeit durch Erhöhung der Materialstärke zu erreichen ist. Die Werte in Wellenrichtung sind signifikant höher als in Querrichtung und fallen prozentual höher aus, je geringer die Dicke des Materials ist. Die Proben 60W zeigen gegenüber den Proben 60GW eine Steigerung der Biegebelastbarkeit von 50%. Ähnlich verhält es sich bei 30W gegenüber 30GW mit einer Verbesserung um 51%. Die größte Differenz wird mit 82% zwischen 15W und 15GW gemessen. In diesem Bereich scheint die Anzahl der Wellen und die Kerndicke mit den Grammaturen der Wellenbahnen zu korrelieren und führt zur merklichen Steigerung der Biegebelastbarkeit in Wellenrichtung. Dieser Effekt nimmt mit zunehmender Materialstärke ab. Nicht zu überprüfen ist, ob sich die Werte von Wellen- und Querrichtung bei wesentlicher Erhöhung der Kerndicke weiter angleichen.

Bekanntlich sinkt die Biegebelastbarkeit eines Materials mit der Reduzierung der Auflagefläche des Druckstempels. Da die durchgeführten Versuche einen vergleichenden Charakter haben und die Unterschiede zwischen den Materialdicken aufzeigen sollen, ist dieser Umstand zu vernachlässigen. Um dennoch einen ersten Eindruck vom Materialverhalten der Wabenplatten unter wechselnden Bedingungen zu erhalten, werden drei weitere Biegebelastungstests an den gleichen Materialdicken durchgeführt. Hierbei wird die vormals am Prüfstempel befestigte Rolle gegen eine Druckplatte mit einer Breite von 40mm ausgetauscht. Es werden drei Proben in Wellenrichtung ausgewählt und jeweils einer weiteren Testreihe unterzogen. Erwartungsgemäß steigt die Biegebelastbarkeit merklich an. Abbildung 3.11 zeigt die Zusammenhänge als Balkendiagramm.



**Abbildung 3.11:** Vergleich der Biegebelastbarkeiten unter Druckrolle und Druckplatte

Den besten Wert mit einer Verbesserung um 70% erreicht die Wabenplatte mit der mittleren Stärke von 30mm. Die dickste Probe (60mm) weist eine Steigerung um 50% auf. Die dünnste Probe (15mm) kommt immerhin auf einen Wert von 24%. Im Hinblick auf zu konstruierende Bauteile aus Wabenplatten wird deshalb empfohlen, dass nicht nur die Materialstärke zu erhöhen ist, sondern die Bereiche der Lasteinleitung großflächig zu dimensionieren sind.

### 3.3 Forschungsfokus: Faltungen

Das Prinzip der Faltung fasziniert die Menschen seit jeher und der Begriff wird in vielen Disziplinen für unterschiedliche Vorgänge angewendet. Der Wortstamm *falten* lässt sich auf das mittelhochdeutsche *valten* und das althochdeutsche *faldan* zurückführen.<sup>39</sup> Es umschreibt den Vorgang, einen Stoff *zusammen* und damit *in Falten* zu legen oder zu *fälteln*. Ein Objekt wird somit in seiner äußeren Erscheinung durch einen Faltprozess verändert und erlangt eine neue räumliche Ebene. Gefaltete Objekte können durch den neu erreichten, verkleinerten Zustand platzsparend verstaut werden. Hierauf weisen auch die weiteren Bedeutungen des Wortstammes wie *wickeln*, *krümmen*, *rollen*, *runzeln* und *biegen* hin. Verschiedene Lexika beschreiben Faltungen als *Biegung*, *Runzel* oder *Knick in einer Fläche*. Der Ausgangsstoff wird bei diesem Vorgang augenscheinlich nicht beschädigt, was zu der Annahme führt, dass ihm die Fähigkeit des Faltens innewohnt. Diese spezielle Eigenschaft kann einerseits im Material selbst begründet sein, wenn es beispielsweise so elastisch ist, dass ein Faltvorgang keine irreversiblen Schäden hinterlässt. Andererseits kann die Addition eines faltfähigen Elements einen vormals starren Gegenstand zur Faltung befähigen und ihn dadurch neuen Widmungen zuführen. Neben dem Ziel, ein Objekt durch Faltungen zu verkleinern, sind weitere Funktionen erkennbar. Einerseits können Flächen durch eine oder mehrere Faltungen einen sehr steifen räumlichen Zustand einnehmen, was vor allem im ingenieurwissenschaftlichen Bereich von Bedeutung ist. Andererseits kann durch die Faltung eine Bewegung im Objekt erzeugt werden, indem der Faltvorgang dynamisch abläuft.

In der Architektur wird das Prinzip der Faltung häufig dort angewendet, wo große Spannweiten mithilfe gefalteter Flächen benötigt werden. Das Ziel sind Leichtbauten, die über ein besonders gutes Verhältnis von Eigengewicht zu Spannweite und Tragfähigkeit verfügen. Hierbei wird das Grundprinzip der Versteifung durch Spreizung bis zu jenem Punkt angewendet, wo der Bauteilquerschnitt soweit ausgedünnt ist, dass er die geforderte Lastableitung nicht mehr sicherstellen kann. Dabei ist ein ausgewogenes Verhältnis von erwarteter Leistungsfähigkeit und Materialersparnis sicherzustellen. Faltungen in der Architektur können dabei in Bauteilen selbst auftreten oder als grundlegendes Gestaltungsprinzip der Gesamtgeometrie wirken.

Sämtliche Faltprozesse unterliegen statischen und ökonomischen Zwängen, die immer im Gesamtzusammenhang zu betrachten sind.<sup>40</sup> Das folgende Kapitel widmet sich dem Thema der Faltungen zunächst auf theoretische Weise, indem eine Begriffsabgrenzung und eine Definition von Winkelbeziehungen in gefalteten Objekten vorgenommen wird. Im Rahmen der Forschungsarbeit werden verschiedene Analyseparameter aufgestellt und in den Versuchsreihen angewandt. Die Unterscheidung statischer und reversibler Falten bildet den Abschluss der theoretischen Untersuchungen. Im Anschluss werden Faltungen in Papieren und anderen Materialien beleuchtet, bevor der Fokus auf gefaltete Bauteile im architektonischen Kontext gelegt wird.

<sup>39</sup>Duden - Die deutsche Rechtschreibung. [Dud13]

<sup>40</sup>vgl. Hilmar, W.: Falten im Leichtbau, in: ARCH+, Ausgabe 131, 1996, S. 82ff. [Hil96]

### 3.3.1 Begriffsdeutung und Themenabgrenzung

Diverse Disziplinen nutzen den Begriff der Faltung zur Beschreibung von Objekten oder Zuständen, deren Struktur durch Einwirkung einer Kraft verändert wird. Gesteinsformationen, die durch dauerhafte Krafteinwirkung entstehen, werden in der Geologie als Falten bezeichnet. Die ursprünglich ebenen Sedimentschichten werden nach und nach verbogen und gewölbt, bis sie einen Grad der Überlappung erreichen. Hierbei spielt die Größe eine untergeordnete Rolle, denn die Faltungen treten im mikroskopischen Bereich der *Runzeln* ebenso auf wie im makroskopischen Bereich der *Gebirge*. Auch lebende Organismen nutzen Faltungen. Pflanzen wenden das Prinzip an, um die Stabilität ihrer Konstruktion zu erhöhen und die aussteifenden Vorteile zu nutzen. Tierische Organismen ihre Bewegungsabläufe durch in Falten gelegte Gliedmaßen. Als Beispiel hierfür sind die Flügel von Vögeln und Insekten zu nennen. Im gefalteten Ruhezustand liegen diese eng am Körper an und ermöglichen im entfalteten Zustand erstaunliche Flugleistungen. Auch die beweglichen Gliedmaßen aller sich fortbewegenden Lebewesen inklusive der kontrahierenden Muskelfibrillen sind im Grunde auf Faltprozesse zurückzuführen. Im Bereich der nicht beweglichen Organe der Organismen sind Faltungen ebenfalls zu finden, wenn Oberflächenvergrößerungen wie im Gehirn oder im Darm notwendig sind. Am Beispiel der Proteinfaltung lassen sich Faltprozesse selbst im Bereich der Moleküle ausmachen. Das Prinzip von Faltungen beschränkt sich jedoch nicht nur auf real existierende Objekte. In der Physik werden sie als Operationen der Signalverarbeitung verstanden. So werden beispielsweise elektrische Spannungen graphisch als Falten dargestellt und Phänomene zwischen Raum und Zeit werden umgangssprachlich als gefaltete Raumzeit beschrieben.<sup>41</sup>

### 3.3.2 Faltvorgänge

Werden Faltungen untersucht, bedarf es zunächst einer näheren Betrachtung und Abgrenzung des zugrunde liegenden Vorgangs. Hier helfen Begriffe aus der Geometrie. Im eindimensionalen Raum wird eine Faltung von einer Linie vollführt. Durch Definition eines Punktes auf der Linie wird diese in zwei Segmente geteilt, die als *Schenkel* bezeichnet werden. Beide Segmente bewegen sich aufeinander zu und eine einfache Faltung ist entstanden. Die Lage der beiden Schenkel zueinander lässt sich durch den Öffnungswinkel beschreiben und wird auch mit den Begriffen *Scharnier* oder *Wendepunkt* bezeichnet. In der zweiten Dimension stellen sich Falten als Bewegung auf einer Ebene dar. Der Punkt zur Definition des Ortes der Faltung wird durch eine Faltenachse ersetzt. Eine Ebene gliedert sich in zwei Schenkelflächen, die sich aufeinander zu bewegen. Durch die Faltenachse verläuft eine Ebene in der Winkelhalbierenden zwischen den beiden Schenkeln. Ihr kommt größere Bedeutung zu, wenn das Scharnier nicht als klar ablesbarer Winkel ausgebildet ist, sondern von einer Kurve beschrieben wird. In der dritten Dimension lösen sich die Achsen der Faltung aus der ursprünglich einzigen Ebene heraus und schaffen Gebilde im Raum, indem zu den schon gefalteten Teilbereichen neue Faltungen hinzukommen und so komplexe räumliche Gebilde erzeugen.

---

<sup>41</sup>Weyerhäuser, K.: Faltung und Korrelation kontinuierlicher Signale, S.3ff. [Wey05]

Paul Jackson hat mit seinem Text *Von der Fläche zur Form* ein Standardwerk zu den Grundlagen von Faltungen verfasst. Er bezeichnet "... das Falten als eine der am häufigsten eingesetzten Gestaltungsmethoden ..." und unterscheidet theoretische Betrachtungen und praktische Anwendungen.<sup>42</sup> Dabei sind lineare, radiale und diagonale Faltungen sowie Gitter, Translationen, Reflexionen, Rotationen, Spiegelungen, Streckungen und Neigungen zu differenzieren. Um die Tragweite der Möglichkeiten des Papierfaltens zu erkennen, seien außerdem Spiralfalten, V-Falten, X-Bögen und Sattelflächen erwähnt. Der Variantenreichtum scheint unerschöpflich und bedarf einer gewissen Ordnung. Diese wird bei genauerer Betrachtung des zu faltenden Materials möglich. Was mit Papieren in drei Dimensionen machbar ist, scheint in alternativen Werkstoffen teilweise nicht umsetzbar. Dies führt dazu, dass der Fokus dieser Arbeit auf linearen Faltungen liegt und detailliert beschrieben wird.

### Origami

Faltungen in Papieren sind untrennbar mit dem japanischen Begriff *Origami* verknüpft, was als *Kunst des Papierfaltens* bekannt ist. Der bekannteste Vertreter und Begründer des *modernen Origami* ist Akira Yoshizawa (\* 14.3.1911, †14.3.2005). Die Papierfaltkunst ist in verschiedene Teilbereiche gegliedert. Die beiden wichtigsten stellen das klassische und das technische Origami dar. Letzteres bildet die Grundlage für die hier untersuchten Faltungen, da es von ebenen Papierflächen ausgeht, welche mit geraden Faltungen ohne andere Formveränderungen wie Biegen oder Knittern zu erzeugen sind. Die zwischen den gefalteten Flächen entstehenden Winkel sind geometrisch zu beschreiben und bilden die berechenbare Grundlage für alle in dieser Arbeit behandelten Bauteile.

*Koryo Miura*, ein Pionier der mathematischen Untersuchung von Faltungen und Namensgeber der *Miura-ori-Faltung*, definiert den Vorgang des Faltens als "Prozess des räumlichen Verdrehens einer Oberfläche mit einer Gaußschen Krümmung von Null, die ihre Invarianz bewahrt."<sup>43</sup> Vereinfachend zusammengefasst bedeutet dies, dass eine ebene Fläche an einer festgelegten Kante gebogen wird und dabei ihre ursprünglichen Eigenschaften wie Plattendicke, Flächengröße und Form beibehält. Es werden keine Teile entfernt oder hinzugefügt. Die Faltung entsteht entlang einer linearen Knicklinie, welche das Bauteil in zwei Teile trennt. Eine der beiden Teile wird bis zu einem festgelegten Endpunkt bewegt und markiert den Knickwinkel zwischen diesen beiden Teilen. Der Ausgangswinkel der beiden Teile beträgt  $180^\circ$ , da sie im Ursprungszustand auf einer Ebene liegen. Es findet nun eine Winkelreduktion bis zum definierten Endpunkt statt. Dieser Winkel muss größer als  $0^\circ$  sein, denn sonst würden beide Ebenen aufeinander liegen. Wird eine Ebene mehrfach gefaltet, sind zwei Zustände abzuleiten. Einerseits werden alle Winkel gleichermaßen reduziert, d.h. alle Teilflächen bewegen sich aufeinander zu und bilden eine *Rolle* oder die Reduktion wechselt sich mit einer Winkelvergrößerung ab. Folgen beide regelmäßig aufeinander, entsteht die so genannte *Zickzack-Faltung*. Wird der Faltvorgang mit seinen Abläufen genauer betrachtet, sind drei Varianten zu differenzieren, die als *Biegen*, *Knittern* oder *Knicken* bezeichnet werden. Dies ist vom skalierten Blick auf das gefaltete Objekt abhängig.

<sup>42</sup>Jackson, P.: Von der Fläche zur Form, S. 9. [Jac11]

<sup>43</sup>Miura, K.; Sakamaki, M.: Mathematik der Form, in: ARCH+, Ausgabe 131, 1996, S. 85-86. [Miu96]

#### Biegen, Knittern und Knicken

Eine gebogene Fläche wird im allgemeinen nicht als Faltung wahrgenommen, doch ist sie bei genauerer Betrachtung im Schnitt eine Aneinanderreihung von vielen linearen Teilstücken, welche über gleichmäßige Knickwinkel zueinander verfügen. Diese Annäherung (Approximation) durch Vielecke erzeugt eine Polygonlinie, deren einzelne Segmente so klein sind, dass die Gesamtform als gleichmäßig gebogene Linie erscheint. Wird die Aneinanderreihung mehrerer kleiner Falten betrachtet, wird dies als *Knittern* bezeichnet. Diese Falten sind im Verhältnis zur Materialstärke und Knitterlänge weder als gleichmäßiger Bogen noch als klar ablesbarer Knick mit dazugehöriger linearer Fläche zu erkennen und markieren somit den Raum zwischen diesen beiden Formen. Ist bei der Betrachtung einer Oberfläche eine Verdrehung eindeutig von den nicht verdrehten Bereichen zu unterscheiden, wird dies als *Knicken* definiert und beschreibt damit das Falten im eigentlichen Sinn. Im Gegensatz zur Begriffsdefinition des Knickens in der Strukturmechanik, bei der ein Bauteil seine Stabilität bis hin zum mechanischen Versagen verliert, ist das Knicken in der Faltentheorie ein integraler Bestandteil des Prozesses und findet an einer exakt definierten Achse statt. Das durch die Faltung entstandene Bauteil ist zu statischen Leistungen fähig, die sein nicht gefalteter Vorgänger nicht zu leisten vermag.

Das Spannungsfeld zwischen Biegen, Knittern und Knicken wird von Franz Zeier ausgelotet. In seinem Werk *Papier – Versuche zwischen Geometrie und Spiel* geht er zunächst auf Rhythmische Studien an Papiermodellen ein. Diese werden aus sehr kleinteiligen Elementen erstellt und erlauben die Untersuchung unterschiedlicher Bearbeitungsmethoden wie Biegen und Rollen, Rillen und Ritzen, Schneiden und Reißen, Stechen und Schlagen sowie Kleben. Die vorgestellten Modellstudien zeigen das Potential gefalteter Flächen und sind auch ohne Papier verständlich.<sup>44</sup>

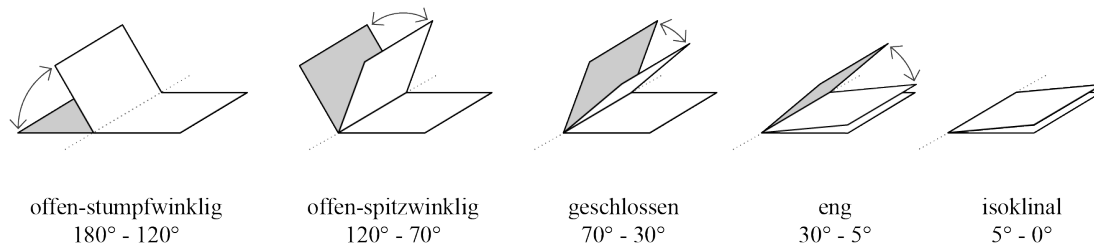
#### 3.3.3 Winkelbeziehungen

Zur Klassifikation von Öffnungswinkeln zwischen Faltschenkeln können aus der Geologie fachliche Definitionen entlehnt werden. Dort werden fünf Klassen unterschieden, die sich nach Größenbereichen der Öffnungswinkel abstufen und mit bei einer nicht gefalteten Fläche mit einem Öffnungswinkel von  $180^\circ$  beginnen. Dies ist empfehlenswert, da sich in regelmäßig gefalteten Objekten eine sprachliche Umschreibung dieser Winkelbereiche als vorteilhaft erweist. Diese fünf Klassen und ihre Winkelspannen werden als *offen-stumpfwinklige*, *offen-spitzwinklige*, *geschlossene*, *enge* und *isoklinale* (griech. *isos* = gleich und *klínein* = neigen) Falten bezeichnet. Letztgenannte beschreiben den extrem spitzwinkligen Bereich einer Faltung, kurz bevor beide Schenkelflächen gänzlich aufeinander treffen. Sie weisen durch die Wortbedeutung der *gleichen Neigung* auf den Umstand hin, dass ihr Innenwinkel so gering ist, dass er zu vernachlässigen ist. Sie gewinnen an Bedeutung, wenn die nachfolgend untersuchten Wellpappen gänzlich umgeklappt werden, um das Material aufzudoppeln oder einen gerundeten Kantenbereich zu erhalten, der vom Deckliner komplett umfasst ist. Dies wird auch als *Umschlag* bezeichnet und schützt die empfindlichen Kernbereiche der Wellpappe.

---

<sup>44</sup>Zeier, F.: *Papier – Versuche zwischen Geometrie und Spiel*, S. 29ff.[Zei13]

Ein negativer Öffnungswinkel existiert nicht, da sich die beiden Schenkelflächen selbst in ihrer physikalischen Ausdehnung begrenzen. Zusammenfassend wird festgestellt, dass sich die Faltung einer Fläche in der Profilsansicht betrachtet als Abfolge geknickter Linien darstellt, deren Schenkel im jeweiligen Öffnungswinkel zueinander angeordnet sind. Nachfolgende Grafik illustriert alle fünf Winkelklassen anhand einer einachsigen Faltung an einer Fläche.



**Abbildung 3.12:** Klassifikation der Winkelspannen bei Faltungen

### 3.3.4 Analysesparameter

Eine Faltung beschreibt zunächst eine Bewegungsänderung, die an oder von einem Objekt durchgeführt wird, das als Teil eines Ganzen oder als Ganzes selbst in Erscheinung tritt. Diese *Translokation* wird nachfolgend im physikalischen Sinne betrachtet und gibt die Ortsveränderung eines Objektes in Relation zur Zeit wieder. Für die Beschreibung *statischer Falten* werden vier grundlegende Parameter benötigt, deren Begriffsdefinitionen in dieser Arbeit vorgeschlagen und als Grundlage verwendet werden:

1. Objektparameter: Wer wird gefaltet?  
Es wird ein Objekt oder Teilobjekt beschrieben, das eine Faltbewegung ausführt. Dies kann eine eindimensionale Linie oder eine zweidimensionale Fläche sein.
2. Positionsparameter: Wo am Objekt wird gefaltet?  
Ortsdefinition, wo am Objekt die Bewegung stattfindet. Bei der Faltung einer Linie wird dies durch einen Punkt, bei Flächen durch eine Achse definiert.
3. Richtungsparameter: Wohin wird gefaltet?  
Beschrieben wird die Richtung, in die sich das Objekt beim Faltprozess bewegt. Dies wird von der Bewegungsachse vorgegeben, die sich am Ort von Positionsparameters befindet. Der Parameter definiert auch, ob sich zwei Schenkel gleichberechtigt aufeinander zubewegen oder ob ein kleinerer Teil des Gesamtobjektes auf den verbleibenden größeren Teil zubewegt wird.
4. Winkelparameter: Wie weit wird gefaltet?  
Diese Angabe definiert, wie groß die Dimensionsveränderung ausfällt und wird als Winkel angegeben.

In weiterführenden Schritten besteht die Möglichkeit, die *Bewegungsparameter* zu differenzieren. Sie setzen die Ausgangs- und Endpositionen der Schenkel in ein Verhältnis zueinander. Dabei sind *Beschleunigungsparameter* und *Tempoparameter* zu unterscheiden. Diese Analysewerkzeuge divergieren nicht nur in den eben genannten Parametern, sondern auch durch ihre Fähigkeit einer *plastischen* oder *elastischen* Reaktion. (*Elastizitätsparameter*) Neben den beschriebenen kinematischen Bewegungsabläufen können Faltprozesse auch hinsichtlich ihrer dynamischen Prozesse analysiert werden. Sie setzen sich mit den eingesetzten Kräften und ihrer Wirkung auseinander. (*Kinetikparameter*) Er ist nicht mit der vorgenannten Definition der Kinematik zu verwechseln. Die hier beschriebene Ausdifferenzierung jenseits der genannten vier grundlegenden Kenngrößen kann bei tiefergehenden Betrachtungen der Thematik notwendig werden.

#### 3.3.5 Statische und reversible Falten

Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal bei der Betrachtung von Faltungen ist ihre Fähigkeit zur Reversibilität, also zur Umkehrung des Faltvorgangs. Sind sie dazu nicht in der Lage, wird von *statischen Falten* gesprochen. Bei der Umkehrbewegung ist zu unterscheiden, ob dieser Prozess von sich aus oder durch äußere Einflüsse geschieht. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Fähigkeit zum Knicken im Material selbst vorhanden ist und nicht durch zugefügte bewegliche Bauteile wie Scharniere ermöglicht wird. Das Material selbst ist dabei in der Lage, auf umformende Kräfte mit einer Knickbewegung zu reagieren, ohne dabei an der Knickstelle irreversibel beschädigt zu werden. Dazu sind Materialien mit einem niedrigen E-Modul wie u.a. Papier in der Lage.

Wirkt eine Kraft einmalig und kann die entstandene Falte nicht mehr in ihre Ausgangsposition zurückkehren, ist eine statische Falte entstanden. Die Endposition ist absolut, es werden keine weiteren Bewegungen ausgeführt. Im Hinblick auf architektonisch wirksame Bauteile ist dies das am häufigsten gewünschte Ergebnis, da sich das gefaltete Objekt nun in einem definierten und damit verifizierbaren Zustand befindet. Dies ist für statische Berechnungen unerlässlich. Häufig werden die gefalteten Objekte mit weiteren Komponenten mechanisch verbunden und bilden nun einen gestaltgebenden Teil des Gesamten. Die Falten können im Werkstoff selbst durch Umformung erzeugt werden, wie das beispielsweise bei gefalteten Papierbahnen im Origami geschieht oder sie können durch Fügung entstehen, indem zwei ebene Flächen eines Materials mit Hilfe eines Verbindungsmittels vereint werden. Beide Vorgänge bergen Vor- und Nachteile. Während die erste Variante durch hohe Fähigkeiten der Lastabtragung im Bereich des Knickes aufwartet, wird sie aus nur einem Ausgangswerkstück hergestellt und ist deshalb in ihrer gestalterischen Ausformung begrenzt. Die zweite Variante verfügt über nahezu unendliche Gestaltungsmöglichkeiten, da sie sich aus Einzelteilen zusammensetzt. Ihre statische Leistungsfähigkeit ist jedoch besonders im Bereich der Fügepunkte begrenzt. Paul Jackson nennt hierfür "... geknickte Stuhlbeine aus Metall (eindimensional), die Zick-Zack-Struktur eines Daches (zweidimensional) und die Muster in einem Marmorkuchen (dreidimensional)" als Beispiele.<sup>45</sup>

---

<sup>45</sup>Jackson, P.: Falten und Entfalten in Kunst und Design. Seite 40-47. [Jac05]



Ist eine Faltung zur Umkehrung in der Lage, wird dies durch materialintegrierte Gelenke realisiert, deren Drehachsen exakt in den Knickachsen der Falten liegen. Paul Jackson nennt “Kettenglieder (eindimensional), Buchseiten (zweidimensional) und der Rauch einer Zigarette (dreidimensional)” als Beispiele für bewegte Falten.<sup>46</sup> Diese Faltungen reagieren auf die einwirkenden Kräfte entweder *plastisch* oder *elastisch*. Plastische Faltungen verbleiben in der Endposition. Hierbei werden die inneren Widerstände des Materials aufgehoben. Bewegt es sich zurück in die Ausgangsposition, spricht man von einer elastischen Reaktion. Jedes Material besitzt einen definierten Endpunkt, bis zu dem die Kraft einwirken kann, ohne eine irreversible Veränderung der Form hervorzurufen. Dieser Punkt der größtmöglichen Deformation heißt *Elastizitätsgrenze* und ist bei jedem Werkstoff unterschiedlich hoch. Sie wird Spannungs-Dehnungs-Diagrammen sichtbar, welche den Spannungsverlauf bei einem Belastungstest grafisch aufzeigen. Zu unterscheiden sind dabei jene elastischen Materialien, die sich durch äußeren Krafteinfluss immer wieder von der Start- in die Endposition bewegen lassen oder sich einmalig in Richtung der Ausgangsposition zurück bewegen wie eine Feder.

### 3.3.6 Faltungen in Papieren

In Abhandlungen zur Thematik wird davon ausgegangen, dass die zu faltenden Ebenen über keine oder eine sehr geringe Materialstärke verfügen. Werden gefaltete Papiere wie Origamiblätter betrachtet, erscheint dies sinnvoll, denn die Materialstärke ist im Verhältnis zur Größe des gefalteten Objektes sehr gering. Hier wird unterstellt, dass die Knickachse der Faltung direkt auf der Ebene liegt. Da die in dieser Arbeit untersuchten Werkstoffe eine wesentlich größere Materialstärke aufweisen, ist diese Annahme nicht möglich, denn die Werkstücke verfügen über zwei Außenflächen und den Bereich dazwischen, der die Materialstärke definiert. Die Knickachse kann demnach auf einer der beiden Außenflächen oder im Kernbereich angesiedelt sein. Dies hat entscheidenden Einfluss auf das Aussehen der geknickten Oberfläche, wenn berücksichtigt wird, dass bei diesem Prozess weder Teile hinzugefügt, noch abgetrennt werden.

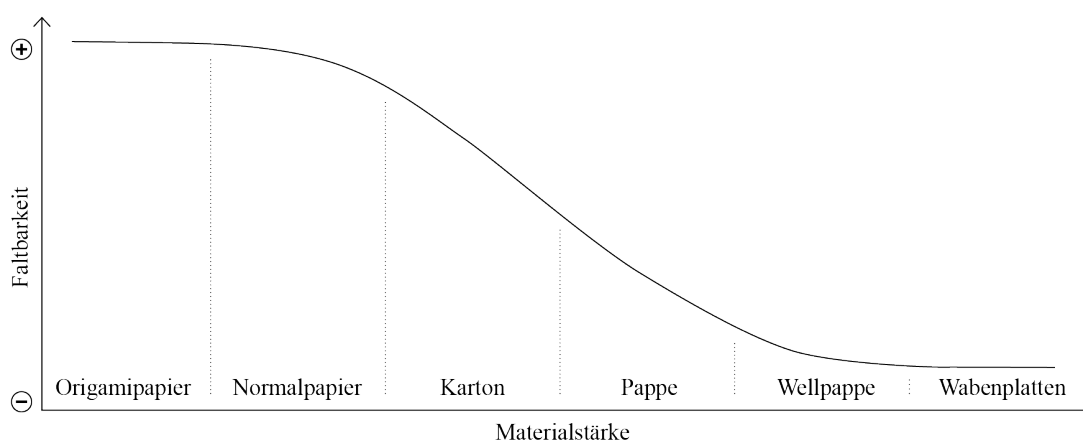
Zur Vereinfachung wird in dieser Arbeit jene Fläche, von der sich die beiden abknickenden Teile wegbewegen, als Außenfläche bezeichnet und jene Fläche, die von ihnen eingeschlossen wird, als Innenfläche definiert. Die Innenflächen schließen den oben genannten Innenwinkel ein. Bei einer Zickzack-Faltung wechseln sich demnach die Außen- und Innenseiten regelmäßig ab. Liegt die Knickachse auf der Außenfläche der gefalteten Platte, so findet zwangsweise eine Stauchung auf der Innenseite des Materials statt und die Außenfläche läuft kontinuierlich um den Knick herum. Dies ist bei den untersuchten Prototypen dieser Arbeit der Fall, da die Lasten, welche in die gefalteten Bauteile eingeleitet werden, über die außen liegenden Deckflächen abgetragen werden. Liegt die Knickachse auf der Innenseite, so wird das Material, das von der inneren Knickachse bis zur äußeren Fläche verläuft, zwangsweise aufgetrennt. Die Innenfläche läuft hierbei kontinuierlich durch und die Außenfläche wird unterbrochen.

---

<sup>46</sup>ebenda. [Jac05]

### 3.3.7 Faltungen in SWAP-Wabenplatten

Trotz des augenscheinlich identischen Vorgangs unterscheiden sich Faltungen in Wabenplatten stark von jenen in Papieren. Das Verhältnis von Materialstärke zu Verformungsgrad im Bereich der Faltung ist hierbei entscheidend. Dabei ist eine dünne Papierfläche durch ihren strukturellen Aufbau wesentlich unempfindlicher gegenüber einem Faltvorgang, denn die kurzen Zellulosefasern werden von der Papiermatrix festgehalten und ihre große Menge gleicht einzelne Beschädigungen aus. Die skalierte Betrachtung der im Verhältnis zur Papierdicke wesentlich höheren Materialstärke einer Wellpappe oder Wabenplatte offenbart bedeutend geringere Kräfte des strukturellen Zusammenhalts. Trotz kleinerer Beschädigungen des Papiers an der Faltkante (Zellulosefasern brechen), bleibt diese Kante stabil und kann je nach Papiersorte sehr häufig gefaltet und in den Ursprungszustand zurück versetzt werden. Hier kommen eine gute Elastizität bei gleichzeitig hohen Festigkeitswerten der Papiere zum Tragen.



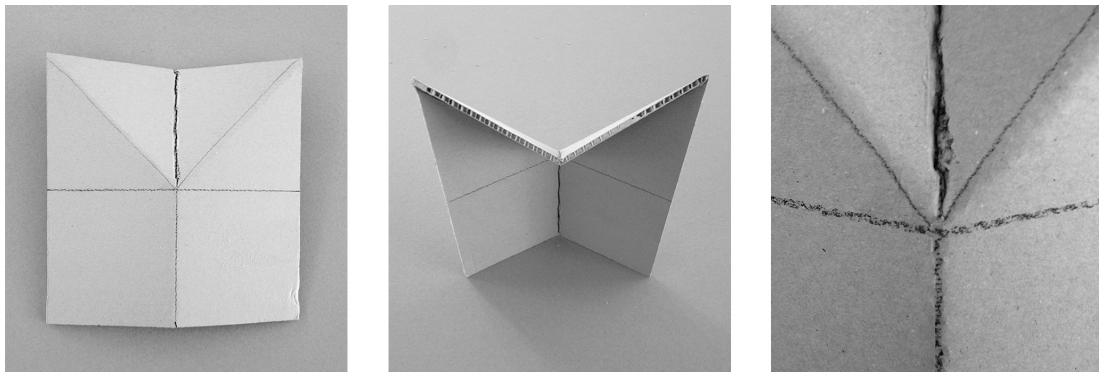
**Abbildung 3.13:** Verhältnis von Material und Materialstärke zur Faltbarkeit

Schlussfolgernd wird die Behauptung aufgestellt, dass die Faltbarkeit eines flächigen Materials mit Zunahme der Materialstärke abnimmt. Nicht ohne Grund werden die Origami-Faltungen mit sehr dünnen Spezialpapieren ( $60 - 70 \text{ g/m}^2$ ) erzeugt. Abbildung 3.13 veranschaulicht, wie die Faltbarkeit eines flächigen Papiergebildes mit steigender Materialstärke abnimmt. Dabei wird auf die Fähigkeit zur gegensinnigen Faltung (siehe Kapitel 3.3.7) eingegangen, die vor allem bei Origamipapieren und dünneren Normalpapieren gegeben ist und in Wellpappen sowie Wabenplatten stark abnimmt. Objekte, welche durch Origami-Techniken oder andere Faltmethoden generiert werden, weisen in regelmäßigen Abständen *antiklastische* Faltungen auf. Diese *gegensinnigen* Faltungen bilden durch den Wechsel der Faltrichtung in ein und derselben Achse jene spitz zulaufende Papierecken aus, die typisch für Origamistrukturen sind. Nachfolgend ist deshalb eine Abgrenzung zwischen antiklastischen und linearen Faltungen vorzunehmen und eine Begründung für die weitere Forschungsarbeit an linearen Faltungen in Wabenplatten vorzubringen.

### Antiklastische Faltvorgänge

In Wabenplatten mit hohen Materialstärken sind gegensinnige Faltungen zwar theoretisch umsetzbar, doch müsste zur Etablierung einer antiklastischen Faltung ein großer Teil des Materials im Bereich der Ecken entfernt werden, was gravierende Folgen für die Stabilität des Bauteils hätte. Dünne SWAP-Platten können in händischen Versuchen gegensinnig gefaltet werden. Hierfür sind nach einem Miura-Ori-Muster die Deckliner streifenförmig mit einem abgerundeten Holzstab einzudrücken. Bei dickeren Platten ist dieser Bereich eventuell mit dem Messer konisch zu entfernen.

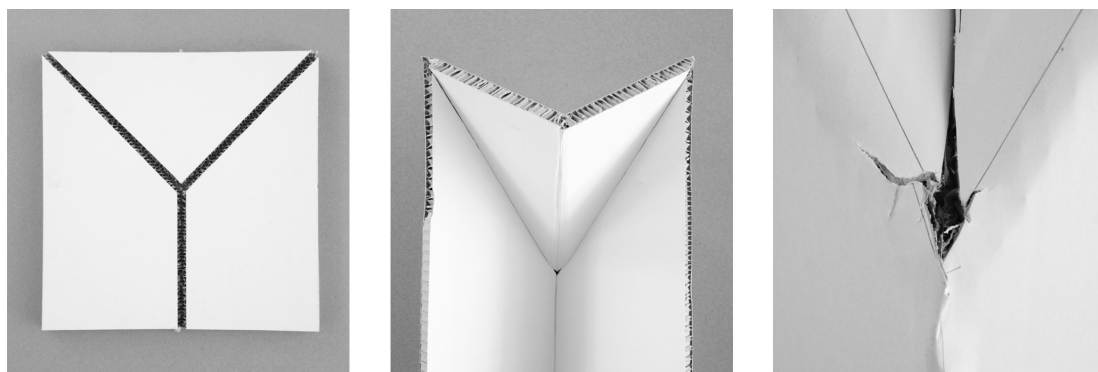
Abbildung 3.14 zeigt eine antiklastische Faltung in einer SWAP-Wabenplatte mit 5mm Stärke und dem dünnsten Decklinerpapier (Testliner:  $190\text{g/m}^2$ ) des Sortiments der Firma SWAP. Links ist die äußere Ansicht des Plattenabschnitts mit eingedrückter Faltachse und leichter Vorfaltung zu erkennen. Das mittlere Bild zeigt das gesamte Objekt. Rechts sind bei einem detaillierten Blick auf die äußere Ecke die unregelmäßigen Eindruckstellen gut zu erkennen. Sie entstehen durch die innere Wabenstruktur bei Bearbeitung mit dem Werkzeug.



**Abbildung 3.14:** Antiklastische Faltung einer Wabenplatte mit 5mm Stärke

Wird die Materialstärke der Wabenplatte erhöht, so reicht ein Eindringen oder ein Entfernen des Deckliners an den Faltachsen nicht mehr aus. Durch die gegensinnige Krümmung würde die aufgewendete Kraft zur Faltung den Deckliner einreißen lassen bevor das Kernmaterial gestaucht würde. Somit müssen streifenförmige Bereiche aus dem Kern herausgeschnitten werden, was zu Löchern in den Eckbereichen führt, da sich hier die Einschnitte überlagern. Diese Beschädigungen entstehen direkt in den empfindlichen Ecken und stellen eine große Gefahr für das Weiterreißen des Bauteils unter Belastung dar.

Abbildung 3.15 zeigt den oben erläuterten Versuch an einer SWAP-Wabenplatte mit 15mm Stärke und einem Decklinerpapier mit PE-Kaschierung (Testliner: 305g/m<sup>2</sup>). Links ist die innere Ansicht der Wabenplatte mit Schnittmuster gut zu erkennen. Das mittlere Foto zeigt die Falte und rechts ist die Beschädigung im Eckbreich nach dem Faltvorgang zu sehen.



**Abbildung 3.15:** Antiklastische Faltung einer Wabenplatte mit 15mm Stärke

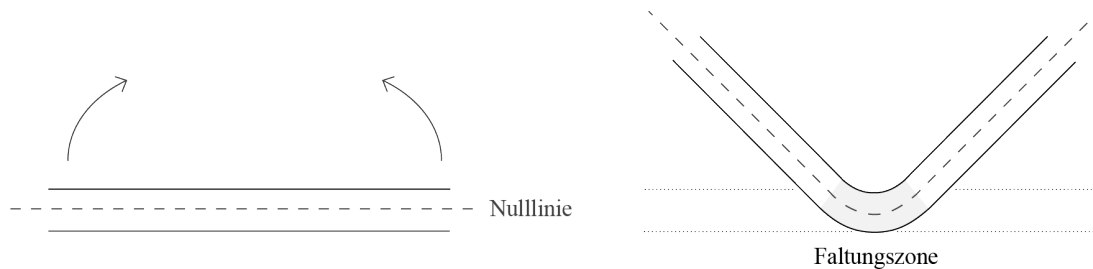
Weitere Versuche mit Platten unterschiedlicher Stärke ergaben eine Verschärfung des Problems bei steigender Materialstärke. Dies führte zur Erkenntnis, dass sich die Elemente nur bis zu einer Stärke von 5mm völlig schadenfrei antiklastisch falten lassen und unter Einschränkungen eine Faltung bis zu einer Stärke von 10mm durchführbar ist.<sup>47</sup> Ab dieser Materialstärke ist eine gegensinnige Faltung nicht zu realisieren. Grundlage ist die Anwendung in Platten mit den schwächsten Decklinern mit und ohne PE-Kaschierung. Die Steifigkeit der SWAP-Elemente mit durchgängigen Decklinern ist für einen Papierwerkstoff beachtlich und ist unter der Bedingung einer großflächigen Lasteinleitung in verschiedenen Szenarien nutzbar. Wie jedes andere Material auch, behalten die Elemente unter Belastung ihre Steifigkeit nur bis zu einem bestimmten Punkt. Wird dieser überschritten, wird die Platte unkontrolliert verformt. Dies geschieht entweder im schwächsten Bereich des Bauteils oder in der Mitte der beiden angreifenden Kräfte, welche für die Biegung verantwortlich sind. Unter diesem Krafteinfluss bildet sich die Biegezone, welche in diesem Zusammenhang als *Faltzone* bezeichnet wird. Hier gehen die nicht verformten *Schenkelflächen* in die verformte Faltfläche über. Der exakte Punkt dieser Zone ist nicht vorab zu bestimmen, da zu viele Parameter einwirken.

Aus den genannten Gründen wird definiert, dass sämtliche Faltvorgänge an den zu untersuchenden dickeren Platten linear ablaufen müssen. Dies führt zwar zu Einschränkungen in der Gestaltungsvielfalt, denn Origami-Muster sind nicht ohne weiteres auf Wabenplatten >5mm übertragbar. Dafür können nun kontrollierte Bedingungen für statische Belastungstests an verifizierten Bauteilen aus SWAP-Platten geschaffen werden.

<sup>47</sup>Ein eindrücken des Deckliners reicht ab einer Stärke von 5mm Plattendicke nicht mehr aus. Der Deckliner muss konisch eingeschnitten werden.

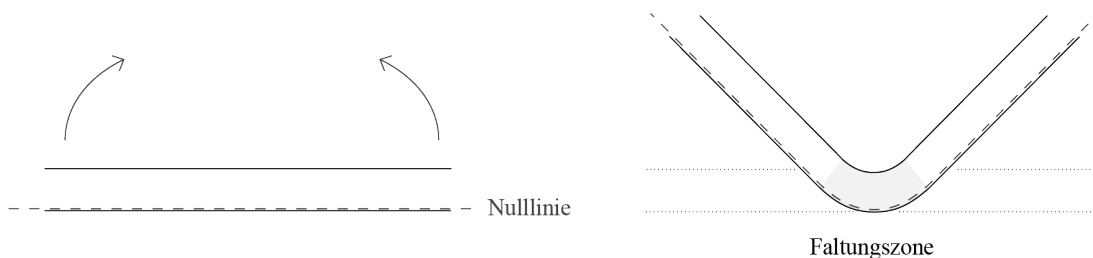
### Lineare Faltvorgänge

Wird ein Bauteil wie beispielsweise ein Metallblech gefaltet, wird es bildlich gesprochen *umgebogen*. Der Vorgang des Umbiegens beansprucht das Werkstück stark, weshalb nicht alle Materialien ohne Zerstörung umzubiegen sind. Hierbei spielt die Sprödigkeit, also die Fähigkeit der plastischen Verformung, eine wichtige Rolle. Wird davon ausgegangen, dass ein umzubiegendes Material eine einheitliche Stoffstruktur besitzt (Verbundbauteile sind in diesem Zusammenhang gesondert zu behandeln), so ist bei Betrachtung des Schnitts durch das Material die *Nulllinie* definierbar, welche durch den geometrischen Schwerpunkt verläuft.<sup>48</sup> (siehe Abb. 3.16)



**Abbildung 3.16:** Nulllinie in einem homogenen Werkstoff

Die Nulllinie teilt das Material in eine Stauchungs- und eine Dehnungszone. Erstgenannte liegt im Innenbereich der beiden sich aufeinander zubewegenden Schenkelflächen, wo es zu einer Querschnittszunahme kommt. Zweitgenannte liegt gegenüber im Bereich der Querschnittsabnahme.

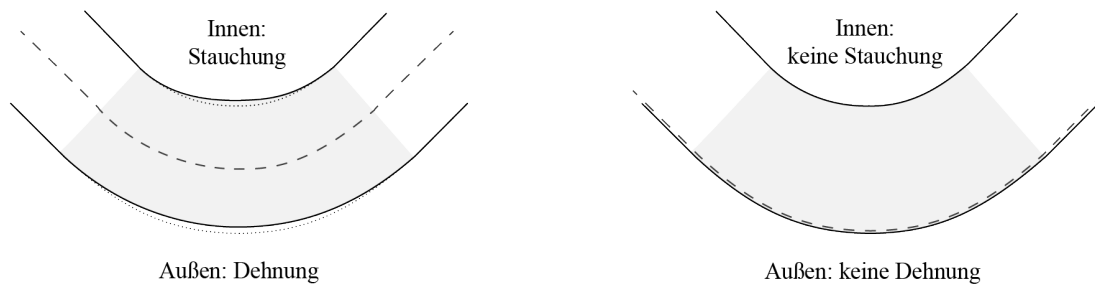


**Abbildung 3.17:** Nulllinie in einer SWAP-Wabenplatte

Im Gegensatz zu den oben erläuterten Sachverhalten sind bei den SWAP-Wabenplatten einige Unterschiede festzustellen. Zunächst bedingt ihr Aufbau als Sandwich eine gesonderte Betrachtung von Kern und Deckmaterial. Die Deckliner weisen relativ gute Zugfestigkeiten auf und sind sehr flexibel bei Belastungen gegen die Fläche. Der Kern aus Wellenstoff ist bei vertikaler Belastung zum Deckliner sehr druckfest, nimmt aber in alle Richtungen nur geringe Zuglasten auf und ist gegenüber seitlicher Stauchung sehr empfindlich.

<sup>48</sup>Die Nulllinie wird in der Balkentheorie auch als neutrale Faser bezeichnet.

Diese Merkmale erweisen sich als großer Vorteil für den in dieser Arbeit untersuchten Faltvorgang. Während die Nulllinie in homogenen Materialien in der Mitte des Körpers verläuft, wandert sie im Sandwichbauteil in den Deckliner, der in die Richtung der Krafteinwirkung weist. In homogenen Materialien finden Stauchung und Dehnung in gleich großem Maße statt, da hier die Nulllinie im Zentrum verläuft. (siehe Abb. 3.18 links) In der SWAP-Wabenplatte verändert sich dieses Verhältnis mit der Verschiebung der Nulllinie. Nun findet ausschließlich eine Stauchung statt und eine Dehnung tritt nicht mehr auf. Da der innere Deckliner entfernt wird, tritt ebenfalls keine Aufwölbung von Material auf. (siehe Abb. 3.18 rechts)



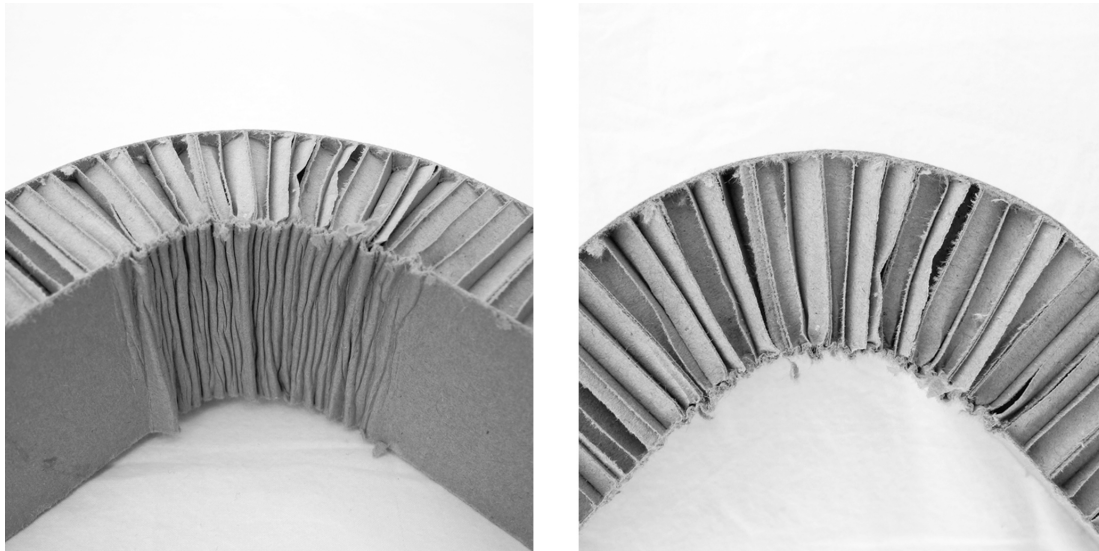
**Abbildung 3.18:** Vergleich: Stauchung und Dehnung bei Faltung

### Faltungen ohne Entfernung des Deckliners

Zum besseren Verständnis der Eigenschaften der SWAP-Wabenplatten werden viele händische Versuchsreihen durchgeführt, welche grundlegende Erkenntnisse über das Material hervorbringen. Hierfür werden Plattenabschnitte mit einer Stärke von 30mm zwischen zwei Schienen eingespannt und umgebogen. Nach eingehender Untersuchung des Werkstoffes wird festgestellt, dass ein Faltvorgang am unbearbeiteten Bauteil (ohne vorherige Schlitze oder Vertiefungen) grundsätzlich mit einer Stauchung der inneren Struktur einhergeht. Einerseits ist die Platte ohne weitere Behandlung an einer definierten Achse zu knicken und andererseits ist die innere Deckfläche im Bereich des Knickachse zu entfernen. Beide Vorgehensweisen haben unterschiedliche Auswirkungen und werden nachfolgend erläutert.

Werden die Wabenplatten ohne weitere Bearbeitung gefaltet, verbiegt die einwirkende Kraft den nicht eingespannten Schenkel soweit, bis sich beide Schenkel in einer isoklinen Position (siehe Kapitel 3.3.3) befinden oder endet in einer Position dazwischen. Während sich der innere Deckliner durch den Stauchungsprozess immer weiter zusammenschiebt und faltenartig aufwölbt, bleibt der äußere Deckliner in seiner Längenausdehnung unverändert. Diese *unkontrollierte Faltung* hat den Nachteil, dass sich der innere Deckliner vom Kernmaterial ablöst. Die Stabilität quer zur Knickachse bleibt weitestgehend erhalten, da der Deckliner trotz Stauchung in Längsrichtung noch Querkkräfte überträgt.

Der Prozess des Biegens erfordert zunächst einen erhöhten Krafteinsatz, da gegen die aufkaschierte innenseitige Papierlage gearbeitet wird. Nachteilig wirkt sich aus, dass die markierte Knickachse nur ungenau getroffen wird, da theoretisch eine gleichmäßige Stauchung des Kernmaterials in beide Längsrichtungen erfolgen sollte. Im Praxistest mit einseitiger Einspannung des Werkstücks hat sich gezeigt, dass die Stauchung immer an der Kante zwischen Spannunterlage und Werkstück beginnt und sich dann weiter in die frei liegende Richtung ausbreitet. Abhilfe würde eine Apparatur schaffen, die den Pappstreifen beidseitig einspannt und einen exakt definierten Radius abfährt, dessen Mittelpunkt in der Knickachse liegt. Dies erscheint bei längeren Bauteilen unrealistisch, da ein erheblicher Kostenaufwand für eine Abkantapparatur entstünde. Die Biegung der Wabenplatte mit beidseitigem Deckliner bis zum Kontakt der Decklinerflächen erzeugt einen Radius, der sich automatisch einstellt und mit der Plattenstärke korreliert. Die äußere Decklage dient dabei als Begrenzung und definiert die später entstehende Umfangslinie. Abbildung 3.19 zeigt einen Probekörper, der ohne jegliche Bearbeitung umgebogen wurde. Gut zu erkennen ist der sich bildende äußere Radius und der innere Radius mit ineinander geschobenem Deckliner, der sich partiell abgelöst hat sowie die konische Stauchung des Kernmaterials.

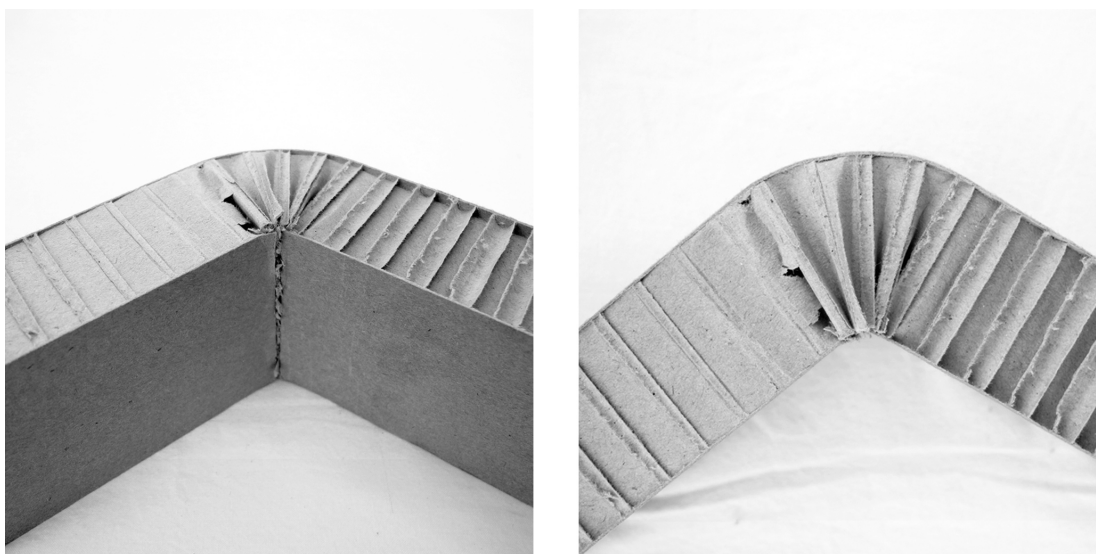


**Abbildung 3.19:** Faltung ohne Entfernung des Deckliners (Materialstärke: 30mm)

Anzumerken ist, dass sich ein Faltvorgang an Probekörpern ohne Decklinerentfernung nur bis zu einer Stärke von  $\leq 30\text{mm}$  durchzuführen ist. Sämtliche Versuche mit dickeren Proben führte zum schlagartigen Versagen des äußeren Deckliners. Grund hierfür scheint zu sein, dass zur Umbiegung des Kernbereichs eine größere Kraft aufzuwenden ist, als der äußere Deckliner standhalten kann. Abhilfe könnte die Applikation eines Deckliners mit höherer Zugbelastbarkeit schaffen.

#### Faltungen nach partieller Entfernung des Deckliners

Der Faltvorgang gelingt ohne Deckenlage mit wesentlich geringerem Kraftaufwand, doch geht auch ein großer Teil der vormaligen Stabilität verloren. Das gewellte Kernmaterial im Inneren kann auftretende Querkräfte kaum abfangen. Durch den wesentlich geringeren Kraftaufwand, der für den Faltvorgang benötigt wird, lassen sich auch längere Bauteile effizient umbiegen. Als vorteilhaft erweist sich die fehlende Papierschicht dahingehend, dass sich der Faltprozess exakt im definierten Bereich abspielt und keine Ungenauigkeiten auftreten, da die beiden Schenkel bis zum Kontakt der Innenkanten der Deckliner umzubiegen sind. Der entstandene Innenwinkel steht in einem proportionalem Verhältnis zur Breite des papierlosen Streifens. Die genaue Definition dieser Zusammenhänge wird in Kapitel 3.3.7 erläutert.



**Abbildung 3.20:** Faltung mit partieller Entfernung des Deckliners

Abbildung 3.20 zeigt diesen Sachverhalt analog zur gebogenen Wabenplatte in der vorhergehenden Abbildung. Den deutlichsten Unterschied stellt der nicht vorhandene Innenradius dar, da hier die beiden inneren Decklinerkanten aneinander stoßen. Durch die partielle Entfernung des Papiers entfällt auch die Aufwölbung im Stauchbereich. Die konische Stauchung des Kernmaterials ist noch besser zu erkennen als im obigen Beispiel, da sich die Stauchrichtung auf einen Punkt (Kontakt der beiden inneren Deckliner) konzentriert und sich nicht auf ein Kreisbogensegment (Innenradius) verteilt.

#### Zusammenhänge

Werden die oben beschriebenen Faltvorgänge verglichen, sind diverse Zusammenhänge festzustellen. Zum besseren Verständnis werden Probekörper mit und ohne Decklinrentfernung bis zur parallelen Ausrichtung der Schenkel gefaltet. Abbildung 3.21 zeigt dies an Proben mit einer Materialstärke von 30mm. Die Probe mit vorhandenem Deckliner in der linken Abbildung verfügt über einen wesentlich größeren Außendurchmesser als das Vergleichsobjekt (Abb. rechts).



Durch den gestauchten inneren Deckliner ergibt sich ein Innendurchmesser von 16mm, welcher eine Berührung der beiden inneren Schenkelflächen verhindert. Der sich durch die Parallelität ergebende Außendurchmesser des Probekörpers mit unbehandeltem Deckliner ist mit 76mm um 26,7 % größer als jener des Vergleichsobjekts. Die partielle Entfernung des Deckliners führt zum direkten Kontakt der inneren Flächenkanten. Ein Innenradius entsteht nicht und der Außenradius resultiert aus der doppelten Materialstärke. Da der Maximalwinkel erreicht ist, lassen sich die beiden berührenden Schenkelflächen nicht weiter falten. Somit hat eine eventuell verbreiterte Entfernung des Deckliners keine Auswirkung auf die Faltung und führt lediglich zu Ungenauigkeiten im Faltprozess. Die Streifenbreite des entfernten Deckliners steht in einem proportionalem Verhältnis zum Winkel des gefalteten Bauteils und lässt sich in einer Formel berechnen. Die genaue Vorgehensweise wird in Kapitel 3.3.8 detailliert beschrieben.

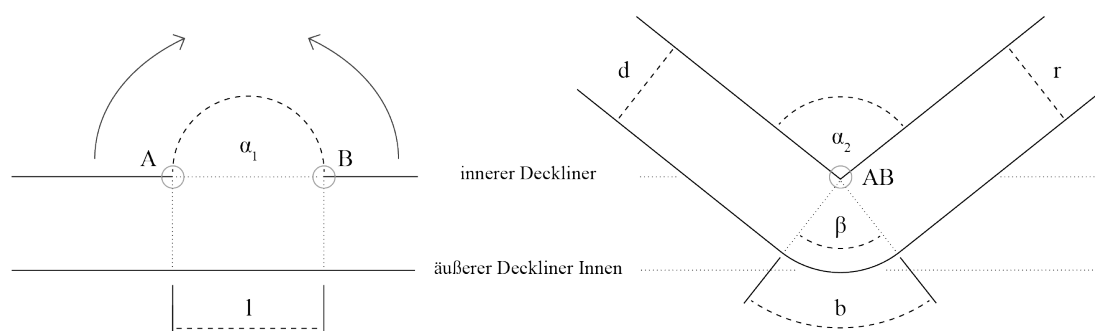


**Abbildung 3.21:** Parallelfaltung ohne (links) und mit Decklinerentfernung (rechts)

Der Versuch wird mit unterschiedlichen Materialstärken wiederholt. Wie oben beschrieben, ist eine Platte mit 60mm Stärke nicht umzubiegen, da der äußere Deckliner noch vor Erreichen der Parallelität der Schenkel versagt. Ein Probekörper mit 18mm Stärke ohne Decklinerentfernung ergibt einen um 10cm vergrößerten Radius. Dies entspricht einer Steigerung um 27,8%. Wird die Materialstärke auf 5mm reduziert, erfolgt wider Erwarten keine Vergrößerung des Durchmessers. Probekörper mit und ohne Decklinerentfernung können bis zum Kontakt beider Schenkelflächen umgebogen werden. Dabei stellt sich bei der Probe mit intaktem Deckliner jedoch ein unschöner, nicht radialer Kurvenverlauf ein. Dies ist auf das nahezu identische Größenverhältnis von Wellenhöhe und Materialstärke zurückzuführen.

### 3.3.8 Partielle Decklinerentfernung und resultierender Winkel

Wird der innere Deckliner einer Wabenplatte in einer bestimmten Breite streifenförmig entfernt und anschließend ein Faltvorgang so lange durchgeführt, bis sich die längsseitigen Kanten der verbleibenden Decklage berühren, wird ein proportionaler Zusammenhang zwischen Streifenbreite und resultierendem Winkel des Endzustandes der Faltung deutlich. Die Streifenbreite wird durch eine rechtwinklige Fläche gebildet, die sich längsseitig durch das gesamte Bauteil ausbreitet und durch eine Mittelachse geteilt wird. Im Querschnitt ist die Überführung des Biegebereichs von einer Geraden in ein Kreissegment zu erkennen. Dieser Zusammenhang ist mathematisch durch eine Formel zu beschreiben. Zur Verdeutlichung ist in Abbildung 3.22 ein Querschnitt durch eine nicht gefaltete (links) und eine gefaltete Wabenplatte (rechts) dargestellt.



**Abbildung 3.22:** Zusammenhänge zwischen Bogenmaß, Radius Außen- und Innenwinkel an einer noch ungefalteten Platte (links) und dem Endzustand nach der Faltung (rechts)

Die Werte von Plattenstärke  $d$ , Radiant  $b$ , Radius  $r$ , Zentriwinkel  $\beta$  und Innenwinkel  $\alpha$  stehen in einem proportionalem Verhältnis zueinander. Als Ausgangspunkt liegt eine ungefaltete Platte vor. Sie ist in Abbildung 3.22 links dargestellt. Ihr Innenwinkel  $\alpha_1$  beträgt  $180^\circ$ . Die Endposition des Faltvorgangs wird durch den Kontakt der beiden Stirnkanten A und B des inneren Deckliners markiert, denn sie definieren jene Streifenbreite  $l$ , die vom Decklinerpapier zu entfernen ist. (siehe 3.22 links) Diese Breite verhält sich proportional zur Länge des Kreisbogens  $b$ , der nach dem vollständigen Faltvorgang vorliegt (siehe Formel 3.2) Die Plattenstärke  $d$  entspricht dem Radius  $r$  des Kreisbogens  $b$  in der späteren Faltung. (siehe Formel 3.3). Der Innenwinkel nach der Faltung wird mit dem Winkel  $\alpha_2$  bezeichnet.

Jeder Schenkel führt eine maximale Drehung von  $90^\circ$  aus, bevor beide Schenkelinnenflächen deckungsgleich aufeinander liegen. Das entspricht dem Gesamtwert des Innenwinkels von  $180^\circ$  und beweist die Symmetrie. Der Zentriwinkel der Faltung ergibt sich, wenn der Innenwinkel  $\alpha_2$  nach dem Faltvorgang vom Ausgangswinkel vor dem Faltvorgang abgezogen wird. Somit ergibt die Summe aus beiden Winkeln einen Halbkreis mit  $180^\circ$ , was aus Formel 3.4 hervorgeht.

**Rechenschritte**

Die in Abbildung 3.22 dargestellten Abhängigkeiten sind mit Formeln zu beschreiben. Unter der Annahme, dass Plattenstärke  $d$  und der gewünschte Innenwinkel der Faltung  $\alpha_2$  bekannt sind, werden folgende Sachverhalte definiert:

$$\overline{AB} = b = l \quad (3.2)$$

$$d = r \quad (3.3)$$

$$\alpha_2 + \beta = 180^\circ \quad (3.4)$$

Zur Berechnung der Streifenbreite des entfernten Deckliners  $l$  kommt zunächst die Formel des Kreisbogens zur Anwendung:

$$b = \pi \cdot r \cdot \frac{\beta}{180^\circ} \quad (3.5)$$

Die Ermittlung des Kreisbogens  $b$  erfordert die Angabe des Zentriwinkels  $\beta$ . Er ergibt sich durch Umstellung mit  $\alpha_2$  nach den Winkelgesetzen. Da sich  $b$  proportional zu  $l$  verhält, erfolgt hier ebenfalls eine Umstellung. Die gesuchte Ausschnittsbreite  $l$  des Deckliners ist folgendermaßen zu ermitteln:

$$l = \pi \cdot r \cdot \frac{(180^\circ - \alpha_2)}{180^\circ} \quad (3.6)$$

**Zusammenfassung**

Die hier vorgestellte Formel dient der schnellen und effizienten Berechnung der zu entfernenden Bereiche des Deckliners einer Wabenplatte zur Generierung einer Faltung. Voraussetzung ist eine lineare Faltung in den beschriebenen Wabenplatten. Für die Ermittlung wird lediglich die Materialstärke und der gewünschte Endwinkel benötigt. Da sich die Berechnungen ausschließlich auf den Innenwinkel beziehen, wirkt sich eine Erhöhung der Materialstärke zwar auf den Umfang des Kreisbogens, jedoch nicht auf die involvierten Winkel und Länge des Kreisbogens aus. Deshalb ist die Formel bei jeder beliebigen Materialstärke anzuwenden.

Die berechneten Ergebnisse werden in mehreren Materialversuchen an Probekörpern mit unterschiedlichen Stärken überprüft und sind verifiziert. Zu beachten ist, dass die SWAP-Wabenplatten bei erhöhtem Krafteinsatz über den gewünschten und durch den Wert  $l$  definierten Winkel hinaus zu falten sind, was eine Beschädigung der inneren Deckliner nach sich zieht. Somit ist das hier beschriebene vorgehen nur dann sinnvoll anzuwenden, wenn eine Wabenplatte mehrfach gefaltet wird, um ein geschlossenes Bauteil zu generieren.

### 3.4 Forschungsfokus: Bauteile aus gefalteten Wabenplatten

Wabenplatten aus Wellpappe werden größtenteils in der Verpackungs- und Möbelindustrie eingesetzt. Eine Anwendung im Baugewerbe ist denk- und machbar, da die Herstellung der Platten als Stand der Technik betrachtet wird. Durch die hier vorgestellten Forschungsergebnisse ist es nun möglich, die Wabenplatten so zu bearbeiten, dass sie an exakt definierten Stellen gefaltet werden können. Dadurch lassen sich die vormals flachen Elemente in räumliche Bauteile verwandeln, die nun eine sehr hohe Stabilität aufweisen. Die Variantenvielfalt ist sehr groß und ermöglicht unzählige Einsatzgebiete im Baugewerbe. Vor allem bei Sonderlösungen ist durch den Einsatz von digitalen Planungswerkzeugen ein großes Potential auszuschöpfen.

Der Fokus der hier beschriebenen Lösungen liegt auf dem Einsatz als Träger und Stütze oder als Verbundbauteil und Rahmen in Architekturprojekten. Die Art der Anwendung ist jederzeit auf andere Themengebiete (Leichtbau, Requisiten, Modelle) zu übertragen. Die Träger und Stützen könnten unter bestimmten Bedingungen herkömmliche Bauteile aus dem Werkstoff Holz ersetzen. Dadurch erfolgt eine Einsparung von Gewicht, Primärenergie (Energie zur Herstellung des Bauteils) und dem natürlich Rohstoff Holz. Da die Wabenplatten ein Recyclingprodukt mit einstellbarem Anteil an natürlichen und recycelten Rohstoffen sind, können Sie die Energiebilanz des zu errichtenden Gebäudes erheblich aufwerten. Im Baugewerbe werden die unterschiedlichsten Materialien zur Herstellung tragender und nichttragender Bauteile eingesetzt und in den meisten Fällen auch gemäß den Materialvorgaben entsprechenden Rahmenbedingungen angewendet. Die in dieser Arbeit vorgestellten konstruktiv wirksamen Elemente sollen den Katalog der etablierten Bauteile erweitern. Dabei sind zwei Szenarien einzugrenzen:

#### **Einsatz als ungefaltetes Plattenmaterial**

Wabenplatten aus Wellpappe finden im Bausektor als Füllstoffe in Sandwichkonstruktionen Anwendung. Die hohe Druckfestigkeit vertikal zum Deckliner prädestiniert sie regelrecht als Unterkonstruktion in Decken und Fußböden. Die im Gegensatz zur Druckbelastbarkeit verminderten Werte der Biegebelastbarkeit bedingen zwar kleinere Spannweiten und höhere Materialstärken als Holzbauteile, doch können die Platten auf einfachste Art und Weise bearbeitet und montiert werden. Als Sandwichbauteile mit dünnen Decklagen aus Holzwerkstoffen wie Sperrholz verbinden die Elemente sämtliche Vorteile, denn hier sind eine hohe Steifigkeit, ein geringes Gewicht und die einfache Möglichkeit der Befestigung mittels Schrauben gegeben. Als Wärmedämmung sind die Wabenplatten unter der Voraussetzung einer wasserdichten und diffusionsoffenen Umgebung sehr leistungstark. Der große Anteil von Hohlräumen verleiht den Elementen sehr gute Dämmeigenschaften.

#### **Einsatz als gefaltetes Bauteil**

Gefaltete Wabenplatten als tragende Bauteile können in der Literatur nicht recherchiert werden. Auch in Abwandlung und thematisch ähnlichen Feldern sind Pappwerkstoffe im Baugewerbe nicht präsent. Der teilweise Ersatz von Holzstützen und -trägern sowie Sekundärkonstruktionen, welche vor allem im Dachbereich vorkommen, erscheint sinnvoll. Die hier vorgestellten Varianten ermöglichen die freie Gestaltung der Tragelemente

nach den Ansprüchen des Entwurfes und lösen sich somit aus dem starren Entwurfsgefüge herkömmlicher Planungen. Gegenüber dem Werkstoff Holz ist neben der hohen Recyclingquote außerdem die Art des Materialverbrauches zu nennen, denn Holzbauteile werden nach einem subtraktiven Prinzip erstellt. Hier erfolgt zunächst die Verringerung des Baumstammes zum Brett mit anschließender Fügung zum gewünschten Bauteil. Das entfernte Material kommt nicht zum bautechnischen Einsatz. Im Gegensatz dazu werden die Pappelemente durch präzise Herstellung für den jeweiligen Einsatz produziert und der minimale Verschnitt wird dem Recyclingkreislauf direkt zugeführt. Darüber hinaus ergibt sich durch das additive Verfahren ein großer gestalterischer Spielraum.

Die Einsatzmöglichkeiten von Wabenplatten aus Papierwerkstoffen im Baugewerbe sind aus den angeführten Gründen gegeben und erfordern nun die Entwicklung tragfähiger Konzepte. Einige der theoretisch erarbeiteten Erkenntnisse können anschließend in realen Anwendungsszenarien überprüft werden. Vor der Beschäftigung mit der Thematik wird geprüft, welche Analogien zu bekannten Baustoffen bestehen. Im oben beschriebenen Themengebiet der Architektur werden vergleichbare Konstruktionen hauptsächlich aus Holz hergestellt und diese entsprechen dem Stand der Technik. In einigen Projekten des Architekten *Shigeru Ban* werden Stützen aus Papprollen eingesetzt und ersetzen herkömmliche Holzstützen. Diese Rollen sind in ihrer Form bis auf die Längenänderung unveränderlich und besitzen eine hohe Dichte. Eine Vergleichbarkeit zwischen Papprollen und gefalteten Stützen ist schwer vorzunehmen, da sich hier eine hohe Dichte mit sehr guten Tragfähigkeiten einer geringeren Dichte mit geringeren Tragfähigkeiten aber einem enormen Gestaltungspotential gegenüberstehen.

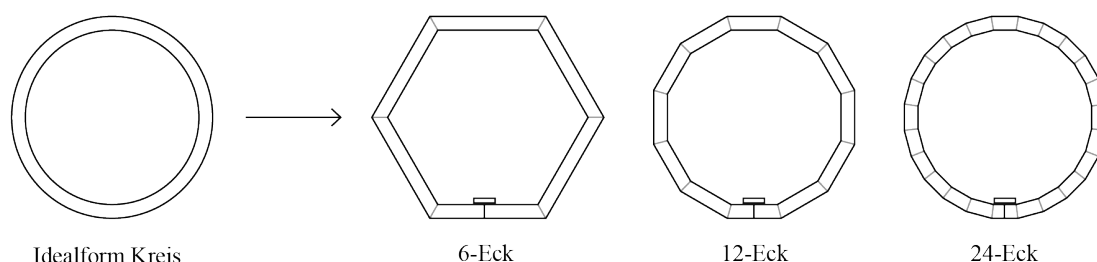
Sämtliche nachfolgend erläuterte Geometrien werden mit SWAP-Wabenplatten mit einer Stärke von 30mm realisiert und in vorgelagerten Testreihen auf verschiedene Verbindungstechniken hin untersucht. Aufgrund der mangelnden Durchstoßfestigkeit der Deckliner und des Kernmaterials, scheiden Schrauben und Verbindungen mit Bolzen oder Stiften frühzeitig aus. Steckverbindungen sind leicht und ohne Hilfsmittel zu realisieren, doch können sie nur geringere Kräfte übertragen, da die Kontaktfläche sehr klein ist und die Kraftübertragung nur über verdreht angeordnete Papierlagen erfolgt. Aus diesem Grund wird festgelegt, dass sämtliche Verbindungen mit handelsüblichem Weißleim unter normaler Lufttrocknung bei Zimmertemperatur (21°C) herzustellen sind. Dies hat den positiven Nebeneffekt, dass auch andere Materialien wie Holzbauteile großflächig mit den Elementen aus Wabenplatten kombiniert werden können, um Verbundbauteile herzustellen.

### 3.4.1 Entwicklung von Geometrien für Stützen

Mit SWAP-Wabenplatten sind Stützen mit verschiedenen Querschnitten zu erzeugen. Um grundlegende Aussagen zur Generierung und Herstellung treffen zu können, erfolgt die Eingrenzung des Forschungsschwerpunkts auf ungerichtete Formen wie Kreis, Dreieck und Quadrat. Ziel sind effiziente Stützenquerschnitte, bei welchen die gefalteten Platten ein Hohlprofil bilden.

#### Querschnittsform: regelmäßiges Polygon

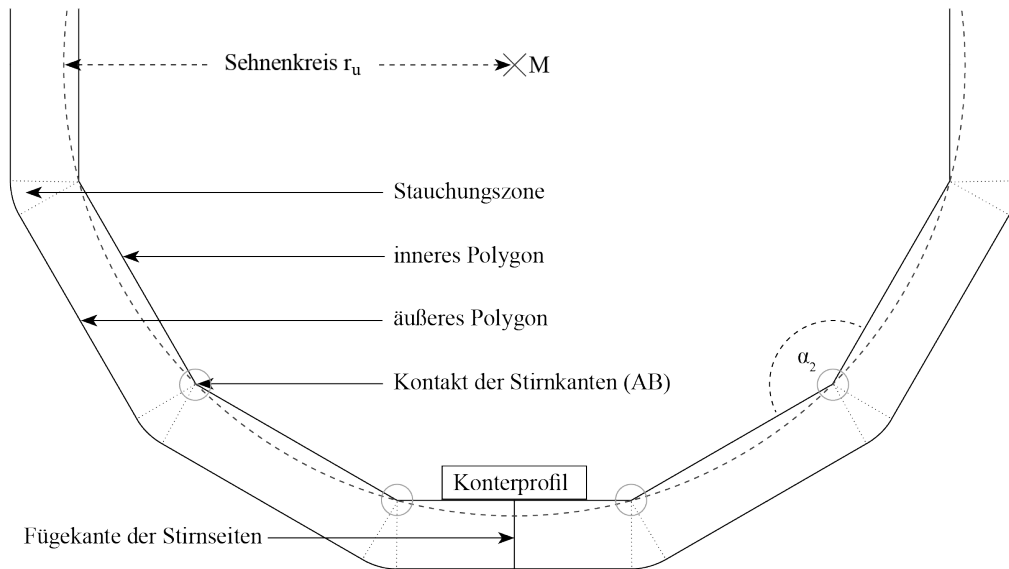
Absolut runde Querschnitte sind aus flachen Wabenplatten nur mit erheblichen Aufwand zu realisieren, denn die Formfindung verläuft immer über den Polygonzug eines regelmäßigen  $n$ -Ecks. Theoretisch ist die Entfernung des gesamten inneren Deckliners denkbar, um die Wabenplatte so gleichmäßig in eine Kreisform umzubiegen. Hierfür werden jedoch aufwändige Halteapparaturen notwendig und der Treffpunkt der beiden offenen Stirnkanten würde so stark unter Spannung stehen, dass die ideale Form nicht dauerhaft bestehen bliebe. Deshalb ist eine idealisierte Kreisform zu generieren. Die Anzahl der Ecken bestimmt hierbei den erforderlichen Aufwand. Je mehr Ecken im Polygonzug vorkommen, je mehr nähert sich der Querschnitt der Idealform des Kreises an, je öfter müssen jedoch die streifenförmigen Bereiche des inneren Deckliners entfernt werden. Abbildung 3.23 zeigt diese Annäherung einer regelmäßigen Polylinie an einen Kreis mittels verschiedener Vielecke.



**Abbildung 3.23:** Annäherung an die Idealform des Kreises mit regelmäßigen Polygonen

Der Kontakt der Stirnkanten stellt die größte Herausforderung bei der Konstruktion einer Stütze aus Wabenplatten dar. Da die Schenkelflächen der umgefalteten Elemente gegen das Kernmaterial arbeiten, erfolgt ein Widerstand gegen den Faltprozess, welcher die Schenkel elastisch zurück federn lässt. Der Zusammenschluss beider Stirnseiten muss diese Kräfte überwinden und dauerhaft kurzschließen. Als praktikabelste Lösung hat sich ein im Inneren verklebtes, über die gesamte Länge der Stütze verlaufendes Konterprofil bewährt. Dieses Profil benötigt ausreichend Kontaktfläche auf beiden Seiten der sich treffenden Deckliner.

Verschiedene Materialexperimente führen zu der Erkenntnis, dass die Breite dieser Fläche der Dicke der Wabenplatte entsprechen muss, mindestens jedoch 3cm, um ausreichend Klebefläche für die Verbindung vorzuhalten. Wird nun eine als Hohlprofil gebildete Stütze mit der Form eines regelmäßigen Vielecks betrachtet, wird ein inneres und ein äußeres Polygon extrahiert. Das innere Polygon stellt ein regelmäßiges *Sehnenvieleck* dar, denn seine Eckpunkte liegen alle auf einem Kreis. Dieser *Umkreisradius* trägt das Formelzeichen  $r_u$ . Abbildung 3.24 zeigt einen Ausschnitt eines regelmäßigen 12-Ecks mit allen beschriebenen Teilen.



**Abbildung 3.24:** Ausschnitt eines Stützenquerschnitts auf Basis eines regelmäßigen 12-Ecks

### Berechnung des Mindestradius

Da die Verklebung der Flächen an der Innenseite vorgenommen wird, ist leicht zu ermitteln, welchen Mindestradius  $r_u$  der Stützenquerschnitt am inneren Deckliner aufweisen muss, damit an der inneren Seitenlänge  $a$  ausreichend Fläche für eine Verklebung gegeben ist. Er beschreibt die Länge von einer Ecke bis zum Mittelpunkt des Polygons. Die Materialstärke hat auf diese Berechnungen keinen Einfluss, da hier wie bereits in Kapitel 3.3.8 beschrieben, nur die Innenflächen und ihre geometrischen Eigenschaften in die Rechnung einfließen. Da die Seitenlänge nach obiger Definition mindestens 6cm betragen muss, kommt folgende Formel zur Berechnung des Umkreisradius zur Anwendung, bei der  $n$  für die Anzahl der Ecken des Vielecks steht.

$$r_u = \frac{a}{2 \sin \frac{180^\circ}{n}} \quad (3.7)$$

Anhand der in Abbildung 3.23 auf Seite 110 dargestellten Beispiele wird die Formel angewendet, um die jeweiligen Mindestdurchmesser der inneren Umkreisradien zu ermitteln. Hierbei wird  $a$  ebenfalls mit 6cm definiert. Die ermittelten Durchmesser zeigen eine proportionale Abhängigkeit von  $r_u$  zur Anzahl der Ecken des Polygons. Die Mindestdurchmesser lauten:

$$6 - \text{Eck} : r_u = 5,73\text{cm} \quad (3.8)$$

$$12 - \text{Eck} : r_u = 11,46\text{cm} \quad (3.9)$$

$$24 - \text{Eck} : r_u = 22,92\text{cm} \quad (3.10)$$

### Ermittlung der Decklinerentfernung

Die in Kapitel 3.3.8 auf Seite 106 beschriebenen Zusammenhänge zwischen dem resultierenden Winkel einer Faltung und der notwendigen Streifenbreite der Decklinerentfernung ist bei der Herstellung der Stützenquerschnitte anzuwenden. Hierbei wird zunächst der Kantenwinkel des n-Ecks benötigt, der in Zusammenhang mit dem resultierenden Winkel als  $\alpha_2$  bezeichnet wird:

$$\alpha_2 = \frac{n-2}{n} \cdot 180^\circ \quad (3.11)$$

Es erfolgt die Integration dieses Lösungsschemas in Formel 3.6. Das Ergebnis stellt die Gesamtformel zur Berechnung der Breite der Decklinerentfernung  $l$  in einem regelmäßigen Vieleck mit der Eckenanzahl  $n$  dar:

$$l = \pi \cdot r \cdot \frac{180^\circ - \left(\frac{n-2}{n} \cdot 180^\circ\right)}{180^\circ} \quad (3.12)$$

### Zusammenhänge

Es wird eine proportionale Abhängigkeit zwischen der Breite des zu entfernenden Deckliners und der Materialstärke zur Kreiszahl  $\pi$  nachgewiesen. Diese Proportionalität tritt bei idealisierten Kreisquerschnitten mit einer beliebigen Anzahl an Ecken auf und betrifft somit auch dreieckige und quadratische Formen. Die Streifenbreite der Decklinerentfernung wird je nach Materialstärke als eine Teilmenge oder als ein Vielfaches von  $\pi$  bestimmt. Bei der Anwendung von Formel 3.12 bei einem 6-Eck mit einer Materialstärke von 3cm wird der Wert für  $l$  der Wert 3,14159cm und damit  $\pi$  ermittelt. Die Streifenbreite eines regelmäßigen Polygons mit der doppelten Anzahl von Ecken (12-Eck) besitzt bei 3cm Materialstärke den halbierten Wert und demnach  $0,5 \cdot \pi$ . Dieser Zusammenhang wird an acht regelmäßigen Polygonen mit sechs gängigen Materialstärken überprüft. Die Formel ist demnach in einen Faktor und einen Multiplikator (hier: Materialstärke) zu unterteilen. Somit sind die Werte für eine Wabenplatte mit einer Stärke von 1cm identisch mit diesem Faktor. Die Ermittlung der Werte für alle anderen Materialstärken erfolgt somit durch einfache Multiplikation.



Die Ergebnisse ermöglichen die schnelle Produktion der Stützenquerschnitte ohne erneute Einzelberechnung mit den erläuterten Formeln und sind in Tabelle 4.6 auf Seite 205 zusammengefasst. Die Tabellenspalten zeigen die Materialstärken in Zentimetern sowie den Faktor, mit dem die Materialstärke multipliziert werden muss, um den jeweiligen Multiplikator für  $\pi$  zu erhalten. Die Zeilen zeigen die jeweiligen Ergebnisse für die n-Ecke nach der Multiplikation auf.

#### Thesen

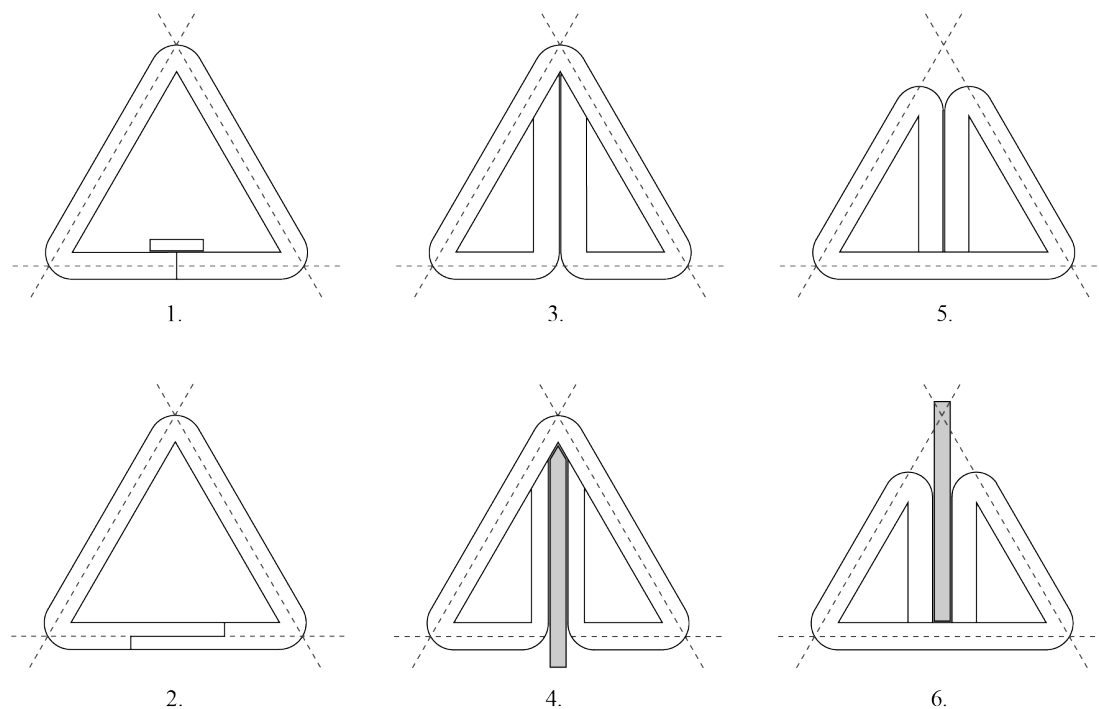
Aus den Ergebnissen sind drei Thesen für die Konstruktion von Stützenquerschnitten auf Basis regelmäßiger Vielecke abzuleiten:

1. Mit der Anzahl der Ecken steigt auch der Umkreisradius des Stützenquerschnitts an. Je kleiner der Stützenquerschnitt ausfällt, je weiter entfernt sich dieser vom Idealgrundriss des Kreises.
2. Wird die Breite der Klebefläche erhöht, so steigt auch der Wert des Umkreisradius im proportionalen Verhältnis an.
3. Die beiden vorgenannten Thesen sowie die allgemeine Anwendung der oben beschriebenen Formel beziehen sich explizit auf das Vorhandensein eines innen verklebten Konterprofils. Andere Konstruktionsarten, welche die Stirnseiten der Wabenplatten auf alternative Art und Weise verbinden (z.B. versetzte Verbindung, eingeklebte Nut- und Federsysteme, u.a.), bleiben davon unberührt.

#### 3.4.2 Querschnittsform: gleichseitiges Dreieck

Regelmäßige Vielecke bergen das Problem einer mangelnden inneren Aussteifung, denn die umlaufenden Zugkräfte sind nicht in der Lage, die idealisierte Kreisform gegen horizontale Kräfte zu stabilisieren. Da der Kernbereich keinen großen Druckkräfte bei stirnseitiger Einleitung standhält, wird bei dauerhafter Horizontalbelastung im Laufe der Zeit eine Verformung des Querschnitts zu einer Ellipse entstehen. Dieses Problem tritt auch bei quadratischen oder rechteckigen Querschnitten auf und ist nur mit einem erhöhten Konstruktionsaufwand in den Knotenpunkten einzudämmen. Aus diesem Grund wird bei der Erforschung der Faltgeometrien und der Herstellung von Prototypen die dreieckige oder auf Dreiecken basierende Querschnittsform gewählt. Im Laufe der Forschungsarbeit werden weitere Einschränkungen zu Ungunsten der unregelmäßigen und gleichschenkligen Dreiecke vorgenommen. Deshalb ist der Fokus gänzlich auf gleichseitige Dreiecke zu legen, denn Stützenquerschnitte auf Basis dieses Typs bieten zwei Möglichkeiten der Bauteilfügung. Der Polygonzug ist an einer der Ecken oder auch an einer der drei Seitenkanten zu schließen. In Abbildung 3.25 sind sechs Varianten dargestellt, wovon vier ausschließlich aus Wabenplatten konstruiert sind. Die Erweiterung zu Hybridbauteilen ist durch den Einschub flächiger Bauteile aus Holz möglich und wird an zwei Querschnitten verdeutlicht. Diese Erweiterungen dienen bei der Konstruktion von Tragsystemen in Gebäuden als Anschlusspunkte, an denen beispielsweise Türen, Fenster oder Wandabschnitte zu montieren sind.

Die hier gezeigten Geometrien beruhen alle auf einer einzigen umgefalteten Wabenplatte, deren Breitenausdehnung begrenzt ist. Die Anwendung einer einzigen Platte verhindert die zwangsweise Fügung der Elemente und erlaubt so den detaillierten Blick auf die Geometrie selbst. Größere Querschnitte sind durch Addition gefalteter Bauteile realisierbar, werden jedoch nicht tiefergehend betrachtet.



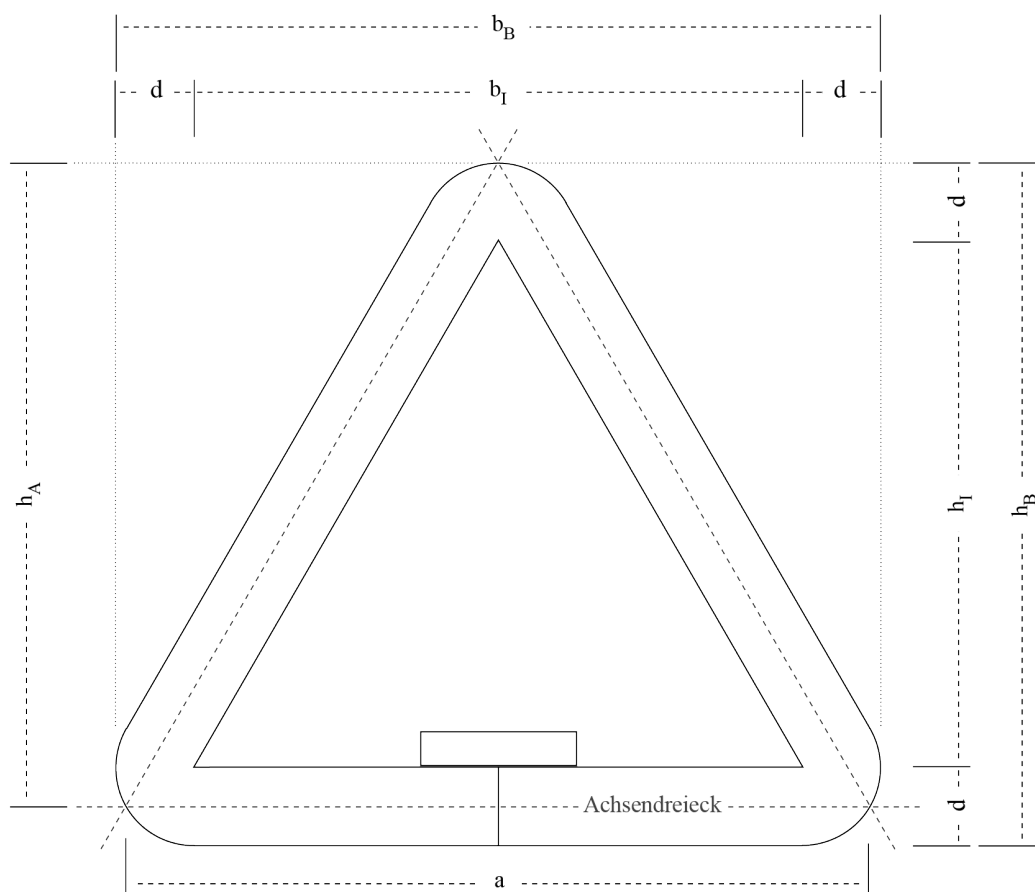
**Abbildung 3.25:** Varianten der Stützenquerschnitte auf Basis eines gleichseitigen Dreiecks

1. Die einfachste Lösung stellt die Faltung zu einem gleichseitigen Dreieck mit stirnseitiger Verbindung auf einer der drei Flächen dar. Im Bereich der Stirnkante der Wabenplatte herrscht eine große Inhomogenität vor, da durch den Zuschnitt der Platte die Wellenbahnen teilweise zertrennt werden. Somit weist die Stirnfläche sehr viele Hohlräume auf, was eine stabile Verklebung erschwert. Um dennoch einen belastbaren dreieckigen Querschnitt zu erreichen, ist im Innenbereich ein Konterprofil zu befestigen. Die außen sichtbare Kante ist mittels farbig passendem Klebeband, einem länglich aufgeklebten Papierstreifen oder durch Überlappung von überstehendem Decklinerpapier optisch zu überbrücken. Der zusätzliche Montageaufwand des Konterprofils wird durch die sehr geringe Anzahl der Falachsen ausgeglichen.

2. Eine Vergrößerung der Kontaktfläche zwischen den beiden zu verbindenden Schenkeln ist durch die Entfernung hälftiger, gegenüberliegender Bereiche des Plattenmaterials zu erreichen. Diese Methode ist als zimmermannsmäßiges, *gerades Blatt* bekannt. Hierbei erhöht sich die zu verklebende Fläche um ein Vielfaches und die Fügung der beiden Schenkelflächen erfolgt durch das Ineinandergreifen der Geometrien. Ein Konterprofil wird nicht benötigt. Nachteilig wirkt sich der erhöhte Materialeinsatz sowie die zusätzlichen Arbeitsschritte der Materialentfernung aus. Die entstehende Fuge ist mit Klebeband zu überbrücken.
3. Die an Variante 1 beschriebene Problematik der statisch schwachen und mittels Konterprofil zu ertüchtigenden Verbindung der Stirnseiten wird durch einen zusätzlich Faltprozess umgangen. Hierfür sind die beiden Schenkel in das innere der Stütze zu klappen und es entsteht eine Unterteilung des gleichseitigen Haupt-Dreiecks in zwei an ihrer Ankathete gespiegelte rechtwinklige Dreiecke. Die zusätzliche Aufdopplung im Inneren sorgt für einen erheblichen Stabilitätsgewinn. Nachteilig wirkt sich aus, dass die Stirnseiten der beiden eingeklappten Schenkel winkelfersetzt auf die Kante der Geometrie treffen. Abhilfe schafft hier ein schräger Anschnitt der Stirnseite im Hypothenuse-Ankathete-Winkel oder das Einsetzen eines Profils mit dreieckigem Querschnitt. Als vorteilhaft erweist sich die selbstverständliche Ausrichtung der Schenkel durch die Bewegung in Richtung Ecke des Querschnitts.
4. Eine Erweiterung zum Hybridbauteil ist durch den Einschub eines flächigen Elements zwischen die aufgedoppelten Elemente der Dreieckshöhe möglich. Die Verbindung erfolgt mittels ganzflächiger Verklebung und erhöht die Stabilität des Querschnitts massiv. Das eingeschobene Element aus Holz oder anderen Plattenmaterialien erlaubt die Befestigung weiterer Bauteile an der Kantenfläche der Stütze durch reversible Montagemittel, welche in der Wabenplatte nicht zu fixieren wären. Das Einschubelement kann bündig oder als Überstand ausgeführt werden, um so die abgelöste Montage weiterer Bauteile zu gewährleisten.
5. Während bei Variante 3 die Fügung der Schenkel an der Seitenfläche des Dreiecks erfolgt, zeigt Variante 5 dieses Beispiel als Faltung der gegenüberliegenden Ecke, wodurch sich die Höhe des Dreiecks reduziert. Die Verbindung der eingeklappten Schenkel erfolgt ebenfalls mittels Verklebung über die gesamte Fläche. Die aufgedoppelten Enden berühren den inneren Deckliner der gegenüberliegenden Längsseite und werden zur Erhöhung der inneren Steifigkeit mit diesem verklebt.
6. Analog zur Erweiterung von Variante 3 zu Variante 4 ist eine Erweiterung zum Hybridbauteil auch bei Stützenquerschnitt 5 realisierbar. Das eingeschobene Element kann ebenfalls bündig mit der Oberkante der Wabenplatte abschließen oder herausgeführt werden, um die Geometrie des gleichseitigen Dreiecks zu vervollständigen. Aus gestalterischen Gesichtspunkten erweist sich diese Form als vorteilhaft, da die dreieckige Form auf das anzuschließende Bauteil zuläuft und dieses somit optisch in Szene setzt. Als nachteilig ist der Einsatz eines Haltegestells zu werten, welches die exakte orthogonale Ausrichtung des eingeschobenen Elements zur unteren Seitenfläche sicherzustellen hat.

### Zusammenhang von Achsendreieck und Bauteildimensionen

Die in Abbildung 3.25 dargestellten Querschnitte basieren auf einem gleichseitigen Dreieck, welches als Achse durch den Schnittpunkt der Wabenplatten verläuft. Für die Varianten 1 – 4 ergeben sich daraus Abhängigkeiten von Höhe und Breite des gefalteten Bauteils zu den Dimensionen des Achsendreiecks. Davon ausgenommen ist ein eventueller Überstand des eingeschobenen, flächigen Elements in Variante 4. Die Kenntnisse dieser Zusammenhänge erlauben die effiziente Konstruktion von Stützenquerschnitten auf Basis gleichseitiger Dreiecke. Für die Erläuterung dieser Zusammenhänge erfolgt die vergrößerte Darstellung von Variante 1 in Abbildung 3.26.



**Abbildung 3.26:** Zusammenhang von Höhe und Breite am Dreiecksquerschnitt

Der Querschnitt zeigt, dass die Mittelachsen der Materialstärke die Kreisabschnitte teilen und exakt auf dem Kreisbogen liegen. Die geometrischen Zusammenhänge sind einzeln zu bestimmen und bedürfen einer detaillierten Betrachtung der Ecksituation.

### Höhe des Bauteils

Die Höhe eines gleichseitigen Dreiecks ist geometrisch mit der Höhenformel zu ermitteln. Wie in Abbildung ersichtlich, eignet sich diese Formel jedoch nicht zur Berechnung der Bauteilhöhe. Die Schnittpunkte der Dreiecksachsen selbst verlaufen exakt durch die Mittelpunkte der Kreisbögen der Faltung und erlauben so auch die exakte Bestimmung der Höhe des Bauteils  $h_B$ . Diese entspricht der Summe der Höhe des Achsendreiecks  $h_A$  und der halben Materialstärke  $d$ . Zunächst erfolgt die Ermittlung von  $h_A$  über die Seitenlänge  $a$  des Dreiecks:

$$h_A = \frac{\sqrt{3}}{2}a \quad (3.13)$$

Die Berechnung der Gesamthöhe des Bauteils wird mit folgender Formel ermittelt:

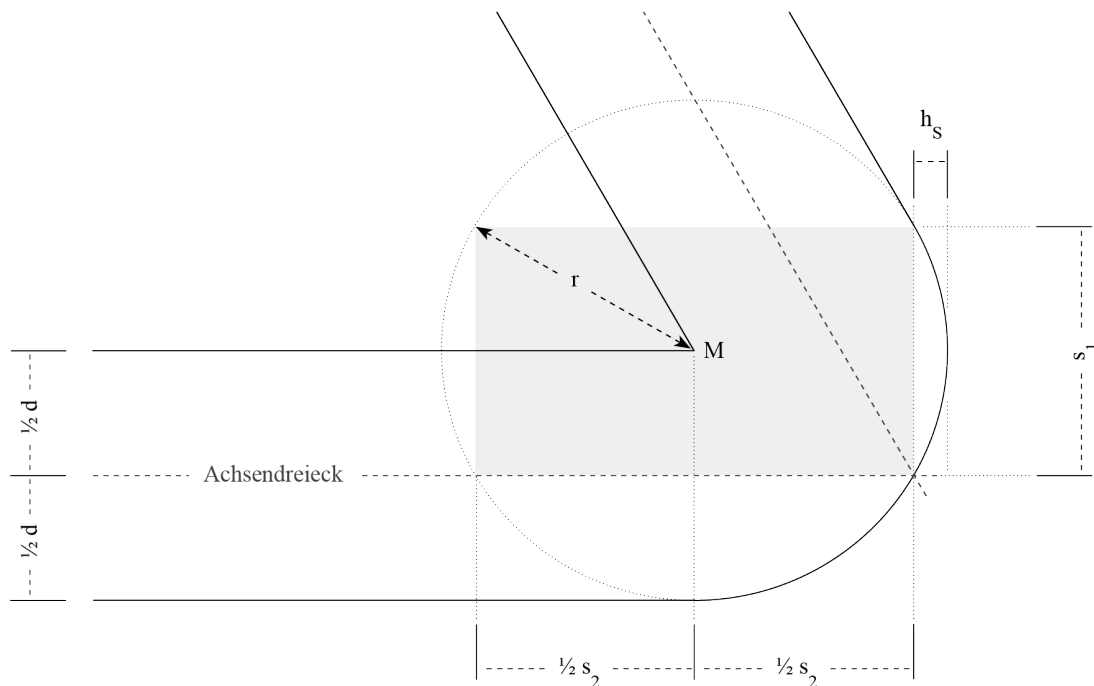
$$h_B = h_A + \frac{1}{2}d \quad (3.14)$$

Die Umstellung beider Rechenschemas führt zur Gesamtformel:

$$h_B = \frac{\sqrt{3}}{2}a + \frac{1}{2}d \quad (3.15)$$

### Breite des Bauteils

Abbildung 3.27 verdeutlicht die folgenden Rechenschritte an einem Ausschnitt des Eckbereiches des gleichseitigen Stützenquerschnitts.



**Abbildung 3.27:** Detailausschnitt des Eckbereiches mit Angabe von Achsendreieck, Radius, Sehnenrechteck, Kreissehne und Segmenthöhe

Die Gesamtbreite des Bauteils ergibt sich aus der Seitenlänge  $a$  des gleichseitigen Dreiecks und der doppelten Segmenthöhe  $h_S$  der Kreissehne  $s_1$ . Die Formel lautet:

$$b_B = a + 2 \cdot h_S \quad (3.16)$$

Für die Berechnung der Segmenthöhe  $h_S$  der Kreissehne  $s_1$  sind einige Vorüberlegungen notwendig. Wie in Kapitel 3.3.8 erläutert, liegt der Kreisbogen  $b$  auf einem Kreis mit einem Radius  $r$ , welcher der Materialstärke  $d$  entspricht. Exakt in der Mitte des Kreisbogens schneiden sich die Achsen des Achsendreiecks und markieren dort den Anfangspunkt der Kreissehne  $s_1$ . Deren Länge entspricht dem Radius des Kreisbogens.

Da  $s_1 = r = d$  gegeben ist, erfolgt die Berechnung der Segmenthöhe  $h_S$  über die Standardformel des Kreissegments:

$$h_S = r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{s_1}{2}\right)^2} \quad (3.17)$$

Da eine Kongruenz zwischen  $(s_1)$ ,  $r$  und  $d$  definiert ist, erfolgt die Umstellung des Rechenschemas nach  $d$ , denn dieser Wert ist neben der Achsenlänge  $a$  grundsätzlich gegeben. Nach Einsetzung der Werte in Formel 3.16 ergibt sich folgender Zwischenschritt:

$$b_B = a + 2 \cdot \left( d - \sqrt{d^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \right) \quad (3.18)$$

Nach Umstellung und Vereinfachung von Formel 3.18 sind zur Bestimmung der Gesamtbreite des Stützenquerschnitts folgende zwei Formelalternativen anzuwenden:

$$b_B = a + 2 \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{3}{4}} \cdot d \right) = a + 2 \cdot \left( d - \frac{\sqrt{3} \cdot d}{2} \right) \quad (3.19)$$

### Breite des inneren Deckliners

Wird der Abstand  $b_I$  zwischen den zwei Streifen der Decklinerentfernung gesucht, ist dieser auf zwei Wegen zu ermitteln. Die erste Variante sieht vor, von dem Ergebnis der Formel 3.19 den doppelten Radius  $r$  abzuziehen. Dies entspricht der Materialstärke  $d$ . Die Herleitung hierfür lautet:

$$b_I = b_B - 2r = b_B - d \quad (3.20)$$

Die zweite Variante ermittelt die Breite des inneren Deckliners  $b_I$  über eine Berechnung der langen Seite  $s_2$  des Sehnendreiecks. Es ist in Abbildung 3.27 als graue Fläche dargestellt. Sein Mittelpunkt (M) ist deckungsgleich mit dem Schnittpunkt der inneren Deckliner und dem Mittelpunkt des Kreisbogens. Der Wert  $b_I$  ergibt sich, wenn von der Länge des Achsendreiecks  $a$  zweimal der hälftige Wert von  $(s_2)$  abgezogen wird. Die Formel hierfür lautet:

$$b_I = a - 2 \cdot \left( \frac{1}{2} s_2 \right) = a - s_2 \quad (3.21)$$

Das Verhältnis der Seitenlängen des Rechtecks ( $s_1$  und  $s_2$ ) ist mit der Quadratwurzel aus 3 zu ermitteln. Da die Summe der Innenwinkel eines gleichseitigen Dreiecks  $180^\circ$  beträgt, führt auch die Division des Sinus von  $60^\circ$  durch den Kosinus von  $60^\circ$  zu diesem Ziel:

$$\sqrt{3} = \frac{\sin 60^\circ}{\cos 60^\circ} = \frac{s_2}{s_1} \quad (3.22)$$

Da  $s_1$  bereits gegeben ist, erfolgt eine Umstellung der Formel nach  $s_2$ :

$$s_2 = \sqrt{3} \cdot s_1 \quad (3.23)$$

Das Ergebnis aus 3.23 wird nun in 3.21 integriert und führt zur Gesamtformel für die Berechnung der Breite des inneren Deckliners:

$$b_I = a - \left( \sqrt{3} \cdot s_1 \right) \quad (3.24)$$

#### **Gegenüberstellung eines vereinfachten Rechenwegs**

Die oben erläuterten Rechenwege zur Bestimmung von Bauteilhöhe und -breite beziehen sich auf die Dimensionen des Achsendreiecks. Dies stellt bei der Generierung von addierten oder sich durch Steckverbindung überschneidenden Bauteilen einen Vorteil dar. Werden die Achsen nicht berücksichtigt, sind die Abmessungen des Querschnitts über eine vereinfachte Formel zu bestimmen. Die Bauteilhöhe ( $h_B$ ) ergibt sich hierbei aus der Summe der doppelten Materialstärke  $d$  und der Höhe ( $h_I$ ) der Innenkanten des Profils.

$$h_B = 2 \cdot d + h_I \quad (3.25)$$

Analog dazu wird die Bauteilbreite aus der Summe der doppelten Materialstärke  $d$  und der Innenkante  $b_I$  ermittelt.

$$b_B = 2 \cdot d + b_I \quad (3.26)$$

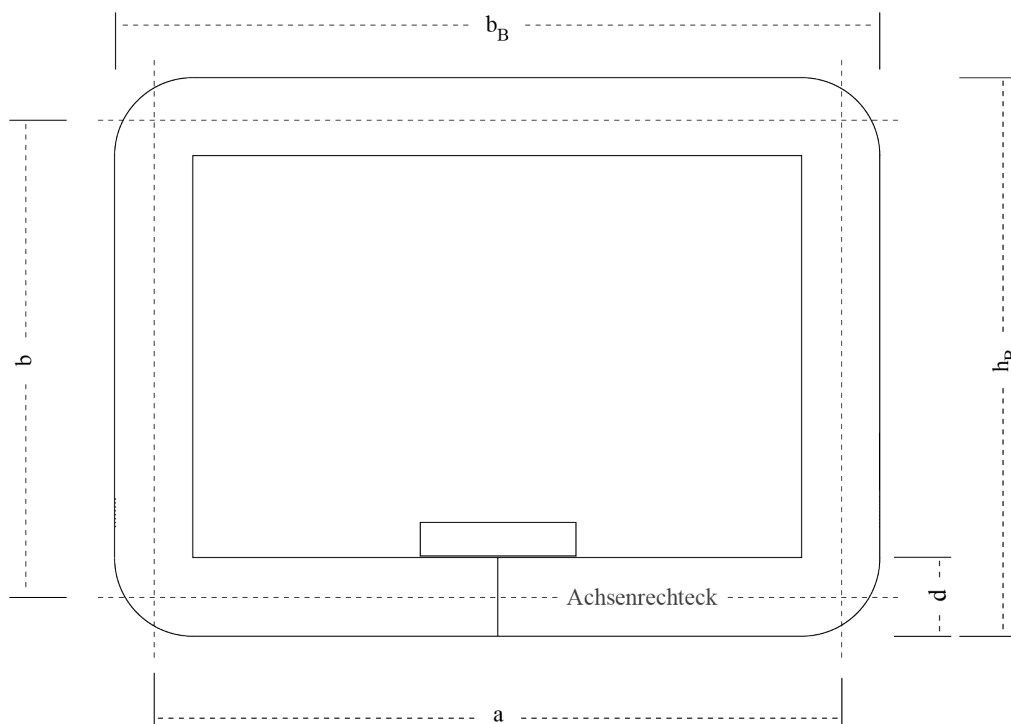
Beide aufgezeigten Rechenwege helfen bei der Bestimmung der bauteileigenen Maßverhältnisse. Die digitale Planung und Übergabe einer Querschnittsgeometrie an den Produzenten wird durch Einbindung der geometrischen Formeln möglich und vereinfacht die Gestaltung und Bemessung der Bauteile enorm. Die in Kapitel 3.5.5 auf Seite 135 vorgestellte Berechnung mithilfe einer programmierten Exceltabelle hilft Entwerfer und Produzenten bei der nahtlosen Übergabe der Bauteilinformationen.

### 3.4.3 Querschnittsform: Rechteck oder Quadrat

Wie in Kapitel 3.4.1 am Beispiel eines regelmäßigen Polygons beschrieben, erfolgt die Bauteilfügung an rechteckigen Querschnitten mithilfe eines Konterprofils. Das Profil hat über die gesamte Länge des Bauteils zu verlaufen und es ist eine ausreichend breite Klebefläche zur Verbindung vorzusehen. Analog dazu ist auch hier eine Verbindung mit einer zimmermannsmäßigen Verbindung möglich, um die Kontaktfläche der Schenkel zu vergrößern. Im Gegensatz zur dreieckigen Geometrie ist die innere Aussteifung nicht gegeben. Die in Kapitel 3.4.2 thematisierte Problematik der inneren Aussteifung bei Querschnitten auf Basis von Polygonen mit mehr als drei Ecken gilt nur für röhrenförmige Stützen. Bei Querschnitten mit rechteckigen Grundformen sorgt eine zusätzlich eingeklebte Diagonale für die notwendige Aussteifung. Als nachteilig ist hier die zusätzliche Bearbeitung der Kanten der Diagonale zu werten, da diese beidseitig mit einer Fase zu versehen ist, um eine optimale Verbindung mit der inneren Ecke des Querschnitts herzustellen.

#### Zusammenhang von Achsenrechteck und Bauteildimensionen

Die Bemessung rechteckiger und quadratischer Querschnitte gestaltet sich wesentlich einfacher als die oben beschriebenen dreieckigen Formen. Durch die rechten Winkel findet keine Überwölbung im Kurvenbereich statt und es erübrigen sich Berechnungen zur Segmenthöhe der Kreissehne.



**Abbildung 3.28:** Zusammenhang von Höhe und Breite am Rechteckquerschnitt



### Bauteilhöhe und Bauteilbreite

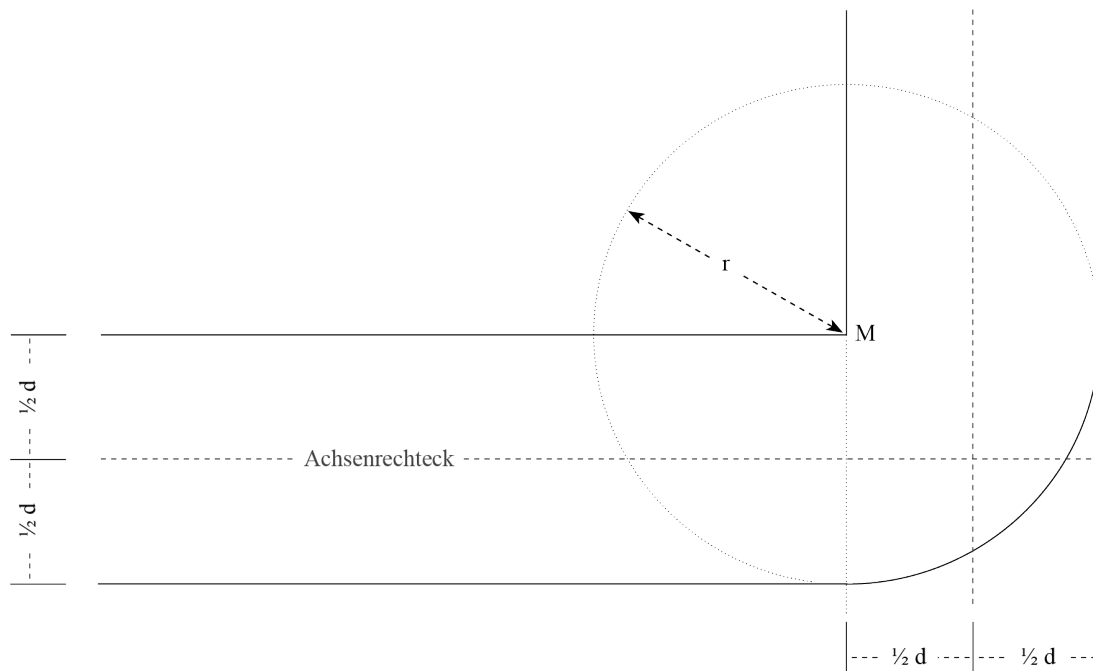
Die Bauteilbreite  $b_B$  entspricht der Summe aus der Breite des zugehörigen inneren Deckliners  $b_I$  und der doppelten Materialstärke. Beschrieben wird dieses Verhältnis mit folgender Formel:

$$b_B = b_I + 2 \cdot d \quad (3.27)$$

Sind die Dimensionen von  $b_I$  nicht gegeben, wird  $b_B$  durch die Summe aus der Breite des Achsenrechtecks  $a$  und der einfachen Materialstärke ermittelt.

$$b_B = a + d \quad (3.28)$$

Die Berechnungen zur Bauteilbreite lassen sich ebenfalls auf die Bauteilhöhe  $h_B$  anwenden. Abbildung 3.29 zeigt die Geometrie einer rechtwinkligen Faltung und verdeutlicht die Position der Mittelachsen. Im Vergleich zu den Querschnitten auf Basis von Dreiecken sind die Geometrien mit rechten Winkeln wesentlich einfacher zu berechnen. Dieser Vorteil kann sich jedoch bei Formen mit mehr als drei Ecken nicht entfalten, da diese immer eine zusätzliche Aussteifung der Geometrie benötigen.

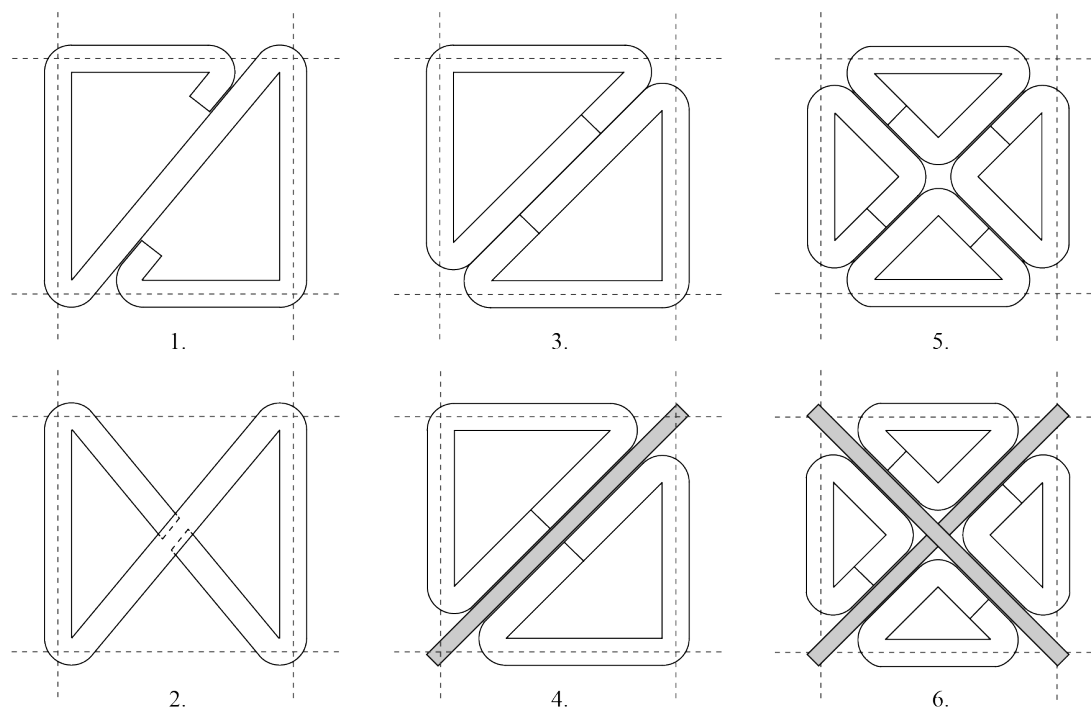


**Abbildung 3.29:** Detailausschnitt des Eckbereiches eines rechteckigen Stützenquerschnitts

Kommen aus gestalterischen Gründen zwingend rechtwinklige Geometrien zum Einsatz und soll dabei auf weitere aussteifende Konstruktionen verzichtet werden, sind die Biegezonen der rechten Winkel besonders zu ertüchtigen, um hier biegesteife Ecken zu realisieren. Dies kann durch Einbringung von Klebstoffen in den Stauchbereich geschehen und durch gezielte Verkürzung der Decklinientfernung. Dadurch entsteht beim Kurzschluss zur rechteckigen Röhre ein umlaufender Widerstand, welcher eine Stabilisierung erzeugt, sofern die Verbindung zwischen den sich treffenden Schenkeln leistungsfähig genug ausgebildet wird. Eine konstruktive Aussteifung ist immer solchen Maßnahmen vorzuziehen, welche die gestalterischen Regeln des Entwurfes schwächen.

### Weitere Strategien zur Erzeugung rechteckiger Stützenquerschnitte

Sind rechteckige Stützenquerschnitte jedoch keine Hohlprofile auf Basis von Rechtecken gewünscht, ist eine Triangulation der Geometrie vorzunehmen. Dabei erfolgt die Zerlegung aller Polygone mit einer Eckenanzahl  $n > 3$  in dreieckige Segmente. Analog zu den dreieckigen Beispielen in Kapitel 3.4.2 zeigt Abbildung 3.30 sechs Varianten, wovon vier gänzlich aus Wabenplatten hergestellt sind und zwei als Hybridbauteil mit einem flächigen Material wie Holz zusammenwirken.



**Abbildung 3.30:** Rechteckige Stützenquerschnitten auf Basis von dreieckigen Geometrien

Die sechs gezeigten Varianten werden nachfolgend erläutert:

1. Die erste Variante einer triangulierten Aussteifung entsteht, indem Decklinerenentfernungen auf beiden Seiten der Wabenplatte vorgenommen werden, um eine gegeneinander verdrehte Einklappung der Schenkel zu erreichen. Der entstandene Steg in der Querschnittsmitte trägt hierbei nicht nur zur horizontalen Aussteifung bei, sondern ertüchtigt die Stütze auch in vertikaler Richtung durch eine zusätzliche kraftableitende Ebene. Nachteilig wirkt sich der Materialverbrauch in Querrichtung aus, da die Diagonale und die zwei zusätzlichen Faltungen weiteres Plattenmaterial benötigen.
2. Zur Reduzierung des Materialverbrauchs und der Wahrung der rechteckigen Außenform sind die eingeklappten Schenkel in die Diagonale einzustecken. Hierfür werden Zapfen aus den Stirnkanten herausgelöst, welche in identische Kerben im Mittelsteg passen. Die Schwächung der Diagonale an dieser Stelle erfordert ggf. eine besonders stabile Befestigungslösung an Kopf und Fuß des Bauteils.
3. Die völlige Loslösung von der Strategie, den Stützenquerschnitt aus nur einer Platte zu generieren, stellt diese Variante dar. Zwei zu rechtwinkligen Dreiecken gefaltete Wabenplatten werden spiegelverkehrt miteinander verklebt. Dabei ist auf den Versatz der Fugekante der Stirnseiten zu achten, denn er stellt die Kraftweiterleitung in der aufgedoppelten Diagonale sicher.
4. Die Erweiterung zum Hybridbauteil erfolgt durch Montage eines flächigen Materials zwischen den Kontaktflächen zweier Geometrien. Als nachteilig ist die diagonale Position der beiden Kanten des eingeschobenen Bauteils zu werten.
5. Die in Beispiel 3 gezeigte Variante dient als Vorlage für die punktsymmetrische Rotation von vier rechtwinkligen Dreiecken. Ein großer Vorteil dieser Variante ist die Möglichkeit, die Grundfläche des Stützenquerschnitts gegenüber den Vorgängervarianten spürbar zu vergrößern.
6. Analog zur Erweiterung der Vorgänger ist Variante fünf durch Einschub flächiger Elemente zum Hybridbauteil zu ertüchtigen. Der symmetrische Aufbau bietet eine Vielzahl von Anschlussmöglichkeiten. Hierbei ist auf ein vernünftiges Verhältnis zwischen Wabenplatte und addiertem Plattenmaterial zu achten.

Die präsentierten Vorschläge zur Generierung von Stützen aus gefalteten Wabenplatten zeigen ein großes Potential der Formen- und Variantenvielfalt. Querschnitte auf Basis eines Rechtecks sind nicht immer in sich stabil. Die Fügung von dreieckigen Profilen ist hier ein probates Mittel, um dieses Problem zu umgehen. Die Fügung mehrerer Elemente führt zu einem erhöhten Material- und Verbindungsaufwand, was im Verhältnis zum gewünschten Nutzen zu überprüfen ist. Die Möglichkeit des Einschubs von zusätzlichen Elementen bietet Vorteile, was jedoch eine exakte Planung der Fügepunkte nach sich zieht. Für sämtliche vorgestellte Profile sind stabile Anschlusspunkte zu entwickeln, was bestenfalls im Kontext des Entwurfes geschieht.

#### 3.4.4 Entwicklung von Geometrien für Träger und Decken

Nach der geometrischen Evaluierung der Stützenquerschnitte erfolgt die Entwicklung von Geometrien, welche als Träger im architektonischen Kontext wirksam werden können. Die Berechnung von Länge, Breite und Winkelbeziehungen der Bauteile erfolgt nach dem oben genannten Schema. Dabei ist ebenfalls denkbar, Verbundbauteile auf Basis entwickelter Varianten zu erzeugen.

Wie bereits in Kapitel 3.4.2 beschrieben, haben reine Wabenkonstruktionen den Nachteil, dass sie mit Ausnahme einer Verklebung nur noch wenige effiziente Verbindungstechnologien wie beispielsweise das Stecken zulassen. Bauteilfügungen mittels Schrauben sind nicht zu empfehlen, da die Papieroberfläche durch die punktuelle Belastung des Fügepunktes zu stark belastet wird. Auch entstehen erhebliche Probleme beim Recycling der Elemente, da zunächst alle Metallteile zu entfernen wären.

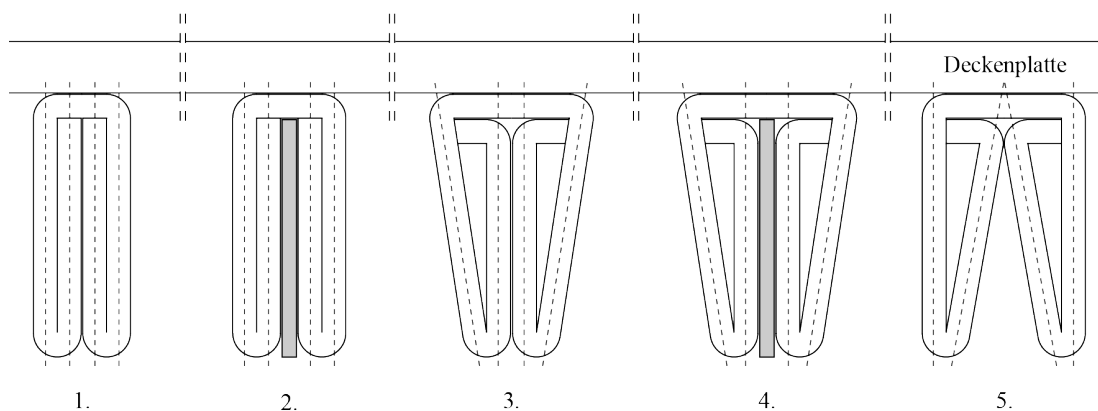
Da stärkere SWAP-Platten bei entsprechendem Rastermaß durchaus als Deckenplatten einsetzbar sind, werden diese bei allen nachfolgenden Beispielen als Grundlage angenommen. Hierbei werden Maßnahmen zur Ertüchtigung gegen Feuer und zur Verbesserung des Schallschutzes ausgeblendet, um die reine Methodik der Bauteilkombination zu beleuchten. Nach Analyse der bereits durchgeführten Versuche ergeben sich zwei Szenarien zur Fügung:

1. Das Bauteil fungiert als reiner Träger. Es ist in sich selbst statisch wirksam und dient der Lastabtragung der aufliegenden Wabenplatte. Die Einleitung der Kräfte erfolgt über die gesamte Länge des Bauteils. Dabei zeigt die Öffnung des Trägers
  - a) zum Raum oder
  - b) zur Deckenplatte.
2. Die Geometrie ist Bestandteil eines Verbunds, der ein tragendes Konstruktionselement mit einem flächigen Nutzelement vereint und somit ein Hybridbauteil aus Träger und Deckenplatte darstellt. Dabei kann die Trägerfaltung
  - a) mit einer ebenen Deckenplatte oder
  - b) mit einer gefalteten Deckenplatte verbunden sein.

Anzumerken ist, dass die hier beschriebenen Beispiele eine Deckenkonstruktion mit zwei linearen Auflagern als Grundlage haben. Dadurch können die Tragelemente parallel zueinander angeordnet werden und entsprechen vom Schema her einer Trapezdecke.

**Träger mit Öffnung zum Raum**

Fünf Trägergeometrien aus Punkt 1 a) sind in 3.31 dargestellt. Charakteristisch sind die geringere Breite bei gleichzeitig großer Höhe.



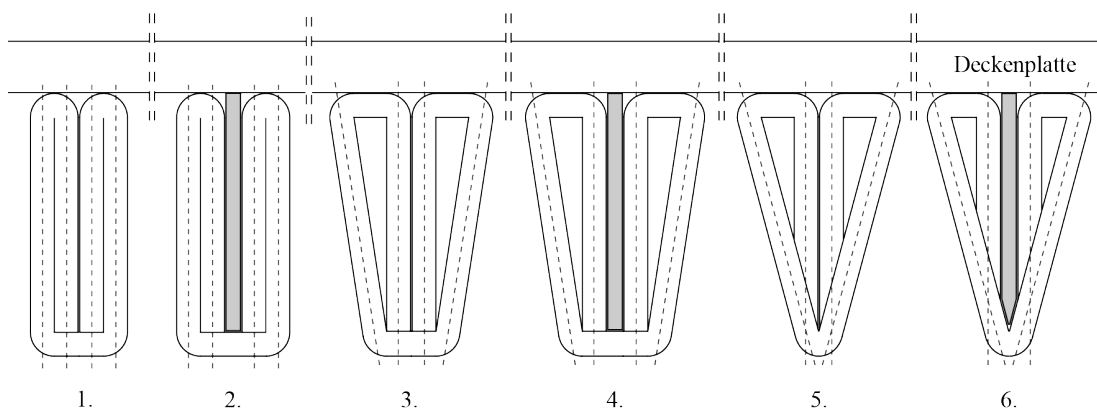
**Abbildung 3.31:** Trägerquerschnitte mit Öffnung zum Raum

1. Die erste Variante zeigt die einfachste Trägerfaltung mit Öffnung zum Raum mit einer isoklinalen Faltung. Sie wird erzeugt, indem die Schenkel der Wabenplatten doppelt ineinander gefaltet und miteinander verklebt werden. (doppelt-zweilagiger Aufbau) Durch die exakte parallele Ausrichtung kann dieses Prinzip zu mehrlagigen Konstruktionen erweitert werden. Um die Trägerwirkung zu erhalten, soll die Bauteilbreite immer geringer ausfallen als die Bauteilhöhe.
2. Eine Erweiterung zum Hybridbauteil ist durch einfachen Einschub und Verklebung eines Plattenmaterials zwischen den innen umgeklappten Schenkeln möglich.
3. Durch Verbreiterung der Kontaktfläche zur Deckenplatte entsteht ein Träger mit einer engen Falte. Das gezeigte Beispiel besitzt einen Winkel von  $10^\circ$ . Die Verbreiterung erzeugt eine Versteifung des Bauteils und erhöht die Widerstandsfähigkeit gegen Torsion.
4. Analog zu Beispiel 2 kann auch diese Geometrie zum Hybridbauteil durch Einschub und Verklebung erweitert werden.
5. Die Gegenbewegung der Schenkel erzeugt eine keilförmige Öffnung, welche im architektonischen Kontext als Installationsebene zum Einsatz kommen oder der Aufnahme von Leuchten dienen kann.

Die Verbindung der Träger mit der Deckenplatte erfolgt über Verklebung, da die aufliegende Konstruktion bestenfalls aus einer Wabenplatte besteht. Holzbauteile oder flächig aufliegende Sekundärkonstruktionen sind so ebenfalls leicht zu befestigen. Als Alternative kommen Stecksysteme infrage, welche durch Erhöhungen und Aussparungen im Material selbst eine kraftschlüssige Verbindung erzeugen.

### Träger mit Öffnung zur Deckenplatte

Trägergeometrien mit Öffnung zum Raum sind durch Spiegelung und geringe Modifikationen aus Trägergeometrien mit Öffnung zur Deckenplatte zu generieren. Die Unteransichten sind einheitlich und werden nicht durch die Fuge einer Faltung gestört.

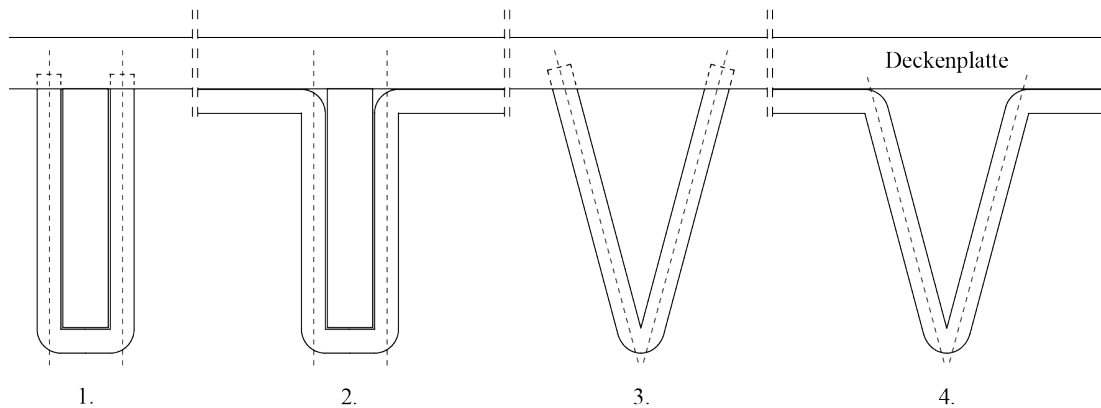


**Abbildung 3.32:** Zur Deckenplatte öffnende Trägerquerschnitte

1. Die erste Variante entspricht dem Pendant aus Abb. 3.31 nach Spiegelung an der horizontalen Achse. Nachteilig wirkt sich die geringe Auflagerbreite aus, denn diese besteht lediglich aus zwei Kurvenverläufen der Stauchzone an der Faltachsen.
2. Das eingeschobene und verklebte flächige Element wird zur Befestigung an der Deckenplatte herangezogen. Die umgeklappten Schenkel der Wabenplatte dienen als Stabilisierung gegen Torsion.
3. Das dritte Beispiel erhöht die Torsionssteifigkeit und generelle Stabilität von Variante 1 durch Verbreiterung der Auflagefläche. Die Querschnitt wandelt sich vom Rechteck zum Trapez.
4. Die Erweiterung zum Hybridbauteil erfolgt analog zu Variante 2. Hier vereinen sich hohe Auflagerfläche mit der Möglichkeit, die Deckenplatte mechanisch mit dem eingeschobenen Element zu verbinden.
5. Die Reduzierung der Trapezform zum gleichschenkligen Dreiecksquerschnitt führt zu einer ästhetischen Erscheinung. Die aufwändige Bearbeitung der konisch angeschrägten Schenkelflächen wirkt sich nachteilig aus.
6. Auch Variante 5 ist zum Hybridbauteil zu erweitern. Es vereint die Vorteile (Torsionsstabilisierung, mechanische Verbindung mit Deckenplatte) mit der klaren Wirkung eines dreieckigen Trägerquerschnitts.

**Verbund von Träger und aufliegender Deckenplatte**

Die oben beschriebenen Träger weisen durch die mehrfache Faltung einen hohen Materialverbrauch auf. Dies führt zu Problemen, wenn die statischen Vorgaben eine große Trägerhöhe bedingen, denn diese wird nicht erreicht, wenn das Material für eine komplette Trägerfaltung verbraucht ist. Eine Lösung sieht vor, auf die inneren Faltungen zu verzichten und die Trägerschenkel stattdessen mechanisch mit der Deckenplatte zu verbinden. Hierfür werden zwei grundlegende Varianten mit je zwei Beispielen erarbeitet.

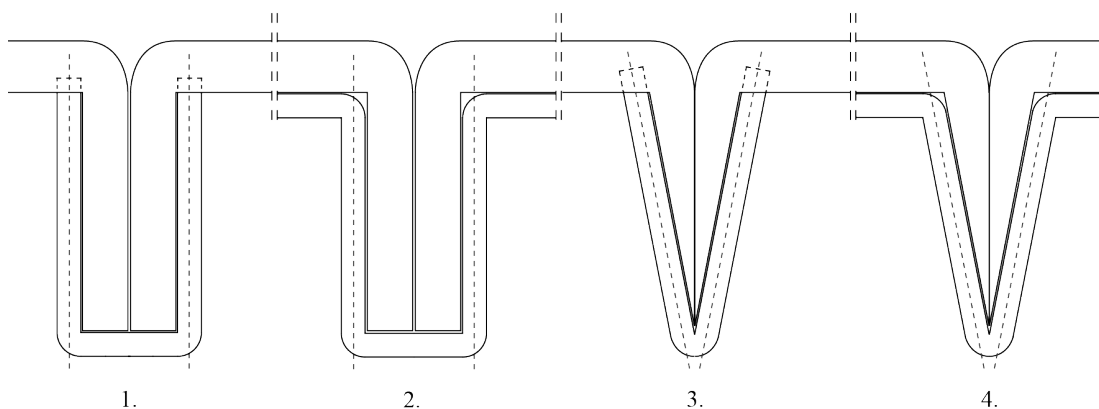


**Abbildung 3.33:** Verbund aus Träger und ebener Deckenplatte

1. Ein Trägerbauteil wird als rechteckiges Hohlkastenprofil ausgeführt und mit Zapfen versehen, welche in passende Kerben in der Deckenplatte zu stecken sind. Da das Hohlprofil in sich nicht ausgesteift ist, empfiehlt sich der Einschub einer Wabenplatte im Inneren des Trägerbauteils. Der gesamte Verbund ist mittels Klebstoff kraftschlüssig auszuführen.
2. Eine Einkerbung der Deckenplatte kann umgangen werden, wenn die Schenkel des Trägers nach außen umgefaltet werden. Die Kontaktflächen bieten größtmögliche Verbindungsqualität und erhöhen den Querschnitt der Deckenplatte in diesem Bereich um die Materialstärke des Trägers. Es ist die Addition mehrerer Träger empfehlenswert, da andernfalls die Stirnkanten der umgefalteten Bereiche frei liegen.
3. Die Kombination von Zapfen und Einkerbungen in der ersten Variante sind auch mit einem Trägerquerschnitt auf Basis eines Dreiecks kombinierbar. Die vormals zur Aussteifung eingeschobene Wabenplatte wird nicht benötigt, da das Dreieck bereits ausgesteift ist.
4. Analog zum zweiten Beispiel ist die Steckverbindung durch nochmalige Umfaltung und Verklebung des Trägers mit der Deckenplatte zu realisieren. Das über die gesamte Deckenbreite reichende Verbundbauteil bietet eine sehr leistungsstarke Tragwirkung bei gleichzeitig extrem geringen Materialverbrauch. Analog zu Beispiel 2 ist auch hier eine Addition von Trägern zu empfehlen.

### Verbund von Träger und eingesteckter Deckenplatte

Die oben beschriebenen Beispiele des Verbunds von Trägern mit einer ebenen Deckenplatte bieten den Vorteil der unendlichen Addition von kombinierten Bauteilen. Sind die zu erwartenden Lasten der Decken zu groß, ist das Achsenraster zu reduzieren. Zusätzlich sind die Randbereiche der Deckenplatten selbst umzufalten. Dadurch erfolgt eine Randversteifung, welche von der Trägergeometrie umfasst wird.



**Abbildung 3.34:** Verbund aus Träger und gefalteter Deckenplatte

1. Das erste Beispiel ist als Erweiterung der ersten Trägergeometrie der oben erläuterten Varianten zu verstehen. Wird dort noch eine einzelne Wabenplatte eingeschoben, erfolgt hier der Einschub beider sich treffenden, umgefalteten Schenkel der Deckenplatten. Die Verzapfung von Träger und Decke sowie die ganzheitliche Verklebung sorgen für einen ganzheitlichen Kraftschluss.
2. Eine Erweiterung nach dem Vorbild der zweiten Variante der obigen Beispiele ist möglich. Hierbei wird der Träger gänzlich um die Deckenschenkel gefaltet und läuft auch im Unterbereich weiter. Somit erfährt die gesamte Platte eine Ertüchtigung um die Materialstärke des Trägers.
3. Die Verzapfung der gefalteten Deckenschenkel ist auch mit einem dreieckigen Trägerquerschnitt denkbar. Diese Konstruktion hat den Vorteil, dass gegenüber den Vorgängern auf eine Faltung verzichtet werden kann und die Geometrie in sich steif ist. Nachteilig wirkt sich die aufwändige Herstellung des schrägen Anschnitts der Deckenschenkel aus. Alternativ ist ein Keil einzufügen, welcher jedoch auch eines eigenen Herstellungsprozesses bedarf.
4. Die gesamte Umfassung der Deckenschenkel mit einem dreieckigen Trägerquerschnitt führt zur Ertüchtigung der gesamten Deckenkonstruktion.



### 3.4.5 Zusammenfassung und Bewertung

Alle vorgestellten Varianten bieten je nach Anforderung diverse Vorteile aber auch vereinzelte Nachteile. Während zum Raum geöffnete Trägerprofile eine große Auflagerfläche der Deckenplatte und die Möglichkeit des Einschubs von weiteren Flächenelementen bieten, sind sie aus ästhetischer Sicht zu hinterfragen. Dennoch bieten sie durch die Fuge eine Vielzahl an Möglichkeiten der Verbindung mit anderen Bauteilen. Die zur Deckenscheibe öffnenden Träger besitzen eine gesamtheitliche Erscheinung ohne Fugen, bieten jedoch weniger große Auflagerflächen und keine weiteren Anschlussmöglichkeiten für zusätzliche Bauteile. Die Verbundbauteile aus Träger und Decke sind besonders sorgfältig zu planen, da die Einsteck- und Fügepunkte exakt zueinander passen müssen. Die gesteckten Varianten sind aus ästhetischer Sicht zu begrüßen, da sie bündig abschließen und keinen Klebstoff benötigen. Die Krafteinleitung in die Stirnseiten der Tragelemente ist jedoch kritisch zu bewerten. Die gefalteten Träger bieten eine hohe Auflagerfläche für die Decke, können diese positiven Effekte aber nur als addierte Elemente nutzen, da sonst die Stirnkanten frei liegen würden. Die größte Tragwirkung erzielen die Verbundbauteile mit zusätzlich gefalteten Deckenscheiben, da hier nicht nur die Trägergeometrie sondern auch die stärkere Deckenscheibe wirkt. Nachteilig wirkt sich hier der hohe Materialverbrauch aus, denn die Trägerhöhe geht der Deckenscheibe in ihrer horizontalen Ausdehnung verloren. Einige der vorgestellten Geometrien sind sehr einfach zu Rahmensystemen erweiterbar und finden in Kapitel 4.3.4 besondere Beachtung.

Die vorliegenden Berechnungen zur Dimensionierung von Stützen- und Trägerquerschnitten bilden einen grundlegenden Kenntnisstand der Materie und ermöglichen die Ermittlung der Kenndaten beliebiger Querschnitte dieses Schemas. Der Fokus intensiverer Forschung wird auf Querschnitte mit Basis gleichseitiger Dreiecke gelegt, da sich hier ein ideales Verhältnis aus theoretischer Forschungstiefe zu realer Umsetzbarkeit ergibt. Die präsentierten Formeln bedürfen einiger Zwischenschritte, sind jedoch leicht nachzuvollziehen und universell anwendbar. Die Werte für rechteckige Querschnitte sind einfach zu ermitteln, bergen jedoch ebenso wie die regelmäßigen Polygonzüge die Notwendigkeit einer inneren Aussteifung.

Die Berechnungen zeigen, dass vielfältige geometrische Beziehungen zwischen der Materialstärke, den Winkeln und den Abmessungen der Querschnitte gegeben sind. Die im Faltprozess entstehenden Rundungen sind jederzeit geometrisch zu berechnen und erlauben die exakte Produktion von vorab definierten Entwürfen. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Abmessungen der Achsendreiecke oder ob die Außenabmessungen der Bauteile gegeben sind. Die mit den Formeln unterlegten Zusammenhänge erlauben die schnelle Ermittlung gesuchter Daten wie der Breite der inneren Deckliner zwischen zwei Decklinerentfernungen oder die Höhe der Bauteile. Die gewonnenen Daten erlauben die Speisung digitaler parametrischer Planungswerkzeuge und bieten dadurch die Möglichkeit, eine hohe gestalterische Freiheit mit einer extrem effizienten Planungs- und Produktionsweise zu verbinden.

Die Faltgeometrien erlauben den Einschub weiterer flächiger Bauteile, was die Generierung von Hybridbauteilen ermöglicht. Dadurch wird nicht nur die architektonische Gestaltungsfreiheit in Verbindung mit tragbaren konstruktiven Lösungen erhöht. Die Hybridbauweise erlaubt auch die Ertüchtigung der Wabenplatten an exakt jenen Stellen, wo stabilisierende Elemente mit guten mechanischen Verbindungseigenschaften benötigt werden. Die aufgezeigten Varianten sollen die vielfältigen Möglichkeiten der Faltungen von ebenen Platten zu tragfähigen Bauteilen aufzeigen. Die Vor- und Nachteile der einzelnen Beispiele werden dargestellt und mit Bemerkungen zur ästhetischen Erscheinung ergänzt. Bei der Generierung der Querschnitte wird darauf geachtet, dass keine längsseitigen Stirnseiten frei liegen, sodass die Oberflächen der Bauteile immer papierbedeckt und somit feuchte- und wasserresistent ausgebildet werden können. Erst dadurch wird ein effizienter Einsatz der Bauteile im architektonischen Kontext möglich.

Einen großen Vorteil bieten die Kombinationsmöglichkeiten gefalteter Geometrien mit ebenen Wabenplatten. Diese kommen beispielsweise als Deckenelemente zum Einsatz. Die vorgestellten Kombinationen in Kapitel 3.4.4 sind leicht abgewandelt auch als Fassaden- oder Dachkonstruktionen denkbar. Hier zeigt sich das große Potential der vorgestellten Lösungen, denn eine Adaption auf zahlreiche Anwendungsgebiete ist möglich und veranschaulicht die Leistungsfähigkeit der Wabenplatten aus Wellpappe.

## 3.5 Forschungsfokus: Abwicklung und Parametrisierung

Dieses Kapitel zeigt Möglichkeiten auf, wie die gewonnenen Erkenntnisse über Querschnitte und Bauteilgeometrien mithilfe digitaler Planungswerkzeuge erfasst, bearbeitet und an den Produzenten der Wabenplatten übergeben werden können. Ziel ist die automatisierte Erstellung von Fräsplänen zur Decklinerentfernung nach Gestaltung von Stützen- und Trägerquerschnitten. Die in dieser Arbeit beschriebenen Bauteile sind durch die ausschließliche Längsfaltung in einer linearen Querabwicklung darstellbar. Dies ermöglicht die exakte Produktion von partiellen Fräsbereichen zur Entfernung des Deckliners an jenen Stellen, wo die Umfaltung stattfinden soll. Die digitale Erfassung, Berechnung und Übergabe an den Produzenten der Wabenplatten befähigt diesen, sämtliche Arbeitsschritte durchzuführen und fertig konfektionierte Elemente anzubieten. Die maschinell begrenzten Bauteilabmessungen der Wabenplatten sind leicht in die Formelzusammenhänge integrierbar und ermöglichen die effiziente und materialsparende Produktion. Die Parametrisierung der Bauteile erfolgt zunächst in Rechenschritten. Diese werden bei Bedarf an automatisierte Programme weitergegeben.

### 3.5.1 Abwicklung eines einfachen Trägers

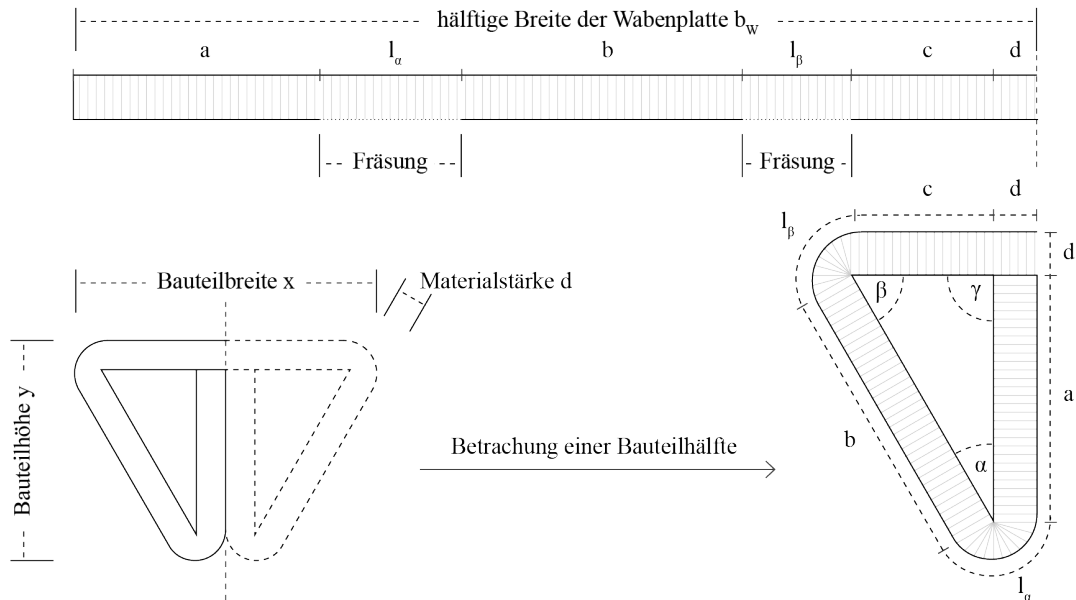
Durch die Entwicklung der Geometrie am Querschnitt des Bauteils ergeben sich Zusammenhänge, welche sich durch Formelsätze beschreiben lassen. Zunächst ist anzumerken, dass sich alle nachfolgenden Erläuterungen auf symmetrische Profile beziehen. Dies erklärt sich aus der naturgegebenen axialen Symmetrie von Trägern und Stützen. Dadurch reicht die Abwicklung des hälftigen Trägers aus, um sämtliche Informationen zu erhalten. Am Beispiel eines Bauteilquerschnitts auf Basis eines gleichseitigen Dreiecks mit eingeklappten Schenkeln (siehe Abb. 3.35) wird die Vorgehensweise erläutert.

### 3.5.2 Ausgangssituation

Grundlegend wird festgestellt, dass die Anzahl der Faltzonen eines Bauteils der Anzahl der Streifen der Decklinerentfernung entsprechen. Durch die Symmetrie der Bauteile sind davon jeweils nur die Hälfte zu ermitteln. Für die Berechnungen werden drei grundlegende Parameter der Bauteildimensionierung benötigt, welche durch gestalterische und statische Bedingungen zu definieren sind. Der rechte Winkel  $\gamma$  ist naturgegebener Bestandteil der Geometrie und die Breite der Wabenplatte  $b_W$  wird durch die produktionstechnischen Bedingungen begrenzt. Zwingend zu definierende Werte sind:

1. Materialstärke  $d$  in mm.
2. Bauteilbreite  $x$
3. Bauteilhöhe  $y$
4. Rechter Winkel  $\gamma$
5. Breite der Wabenplatte  $b_W$

In Abwicklung 3.35 ist abzulesen, dass das Bauteil in abwechselnde Bereiche mit und ohne Decklinerentfernung gegliedert ist. Die drei Innenwinkel ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) der hälftigen Abwicklung sind durch die Winkelgesetze zu berechnen. Sie können durch die in Kapitel 3.3.8 erläuterten Bedingungen in einen Zusammenhang mit der Breite der Decklinerentfernung gebracht werden. Durch die längsseitige Faltung verfügen diese Bereiche über konstante Breiten, welche in proportionalen Verhältnissen zueinander stehen.



**Abbildung 3.35:** Hältige Abwicklung einer Bauteils am Beispiel einer Stütze auf Basis eines gleichseitigen Dreiecks

Für das in Abbildung 3.35 gezeigte Beispiel des rechtwinkligen Dreiecks sind folgende Längen zu ermitteln:

1. Gegenkathete a
2. Decklinerentfernung  $l_\alpha$  zur Erzeugung des Innenwinkels  $\alpha$
3. Hypothenuse b
4. Decklinerentfernung  $l_\beta$  zur Erzeugung des Innenwinkels  $\beta$
5. Ankathete c
6. Materialstärke d

### 3.5.3 Rechnerische Formelherleitung

Durch Vorgabe der Materialstärke  $d$ , der Bauteilbreite  $x$  und der Bauteilhöhe  $y$  durch den Entwerfer sind die gesuchten Werte zu ermitteln. Für die Berechnung der Gesamtbreite der Wabenplatte  $b_W$  zur Erzeugung des gefalteten Bauteils und der sich ergebenden Einzellängen der Abwicklung sind zunächst die Längen von Ankathete  $a$ , Hypotenuse  $b$  und Gegenkathete  $c$  zu ermitteln. Anschließend sind die Längen der beiden Decklinerentfernungen  $l_\alpha$  und  $l_\beta$  zu berechnen. Die Gesamtformel führt alle Ergebnisse mit dem Faktor 2 zusammen.

$$b_W = 2 \cdot (a + b + c + d + l_\alpha + l_\beta) \quad (3.29)$$

#### Länge der Gegenkathete $a$

Die Gegenkathete  $a$  ergibt sich aus der Differenz von Bauteilhöhe  $y$  und der doppelten Materialstärke  $d$ :

$$a = y - 2 \cdot d \quad (3.30)$$

#### Länge der Ankathete $c$

Die Differenz der hälftigen Bauteilbreite  $x$  und der doppelten Materialstärke  $d$  ergibt  $c$ :

$$c = \frac{x}{2} - 2 \cdot d \quad (3.31)$$

#### Länge der Hypotenuse $b$

Die diagonal verlaufende Hypotenuse  $b$  wird durch Umstellung des Satzes des Pythagoras ermittelt:

$$b = \sqrt{a^2 + c^2} \quad (3.32)$$

Die Umstellung der Formel nach  $y$  und  $d$  erlaubt die Berechnung mit den gegebenen Werten:

$$b = \sqrt{(y - 2 \cdot d)^2 + \left(\frac{x}{2} - 2 \cdot d\right)^2} \quad (3.33)$$

#### Länge der Decklinerentfernung $l_\alpha$

Zunächst ist der Tangens von  $\alpha$  mittels Teilung der Gegenkathete durch Ankathete zu errechnen. Die grundlegende Formel lautet:

$$\tan \alpha = \frac{c}{a} = \frac{\frac{x}{2} - 2 \cdot d}{y - 2 \cdot d} \quad (3.34)$$

Nach Umstellung und Einbeziehung der Umkehrfunktion unter Berücksichtigung der halben Bauteilbreite gilt für  $\alpha$ :

$$\alpha = \arctan \left( \frac{4 \cdot d - x}{4 \cdot d - 2y} \right) \quad (3.35)$$

Der ermittelte Winkel  $\alpha$  ist nun in die Formel 3.6 auf Seite 107 einzusetzen, wobei der Radius  $r$  der Materialstärke  $d$  entspricht. Die Länge der Decklinerentfernung  $l_\alpha$  für den Winkel  $\alpha$  ist folgendermaßen zu berechnen:

$$l_\alpha = \pi \cdot d \cdot \left( \frac{180^\circ - \arctan\left(\frac{4 \cdot d - x}{4 \cdot d - 2y}\right)}{180^\circ} \right) \quad (3.36)$$

#### Länge der Decklinerentfernung $l_\beta$

Analog zum oben beschriebenen Verfahren ist die Berechnung von  $\beta$  durch die Ermittlung des Tangens möglich. Durch die Innenwinkelgesetze des rechtwinkligen Dreiecks ist dieser Schritt zu vereinfachen, indem der gegebene Winkel  $\gamma$  und der oben errechnete Winkel  $\alpha$  vom Gesamtinnenwinkel abgezogen werden:

$$\beta = 180^\circ - \gamma - \alpha \quad (3.37)$$

Anschließend erfolgt derselbe Rechenschritt wie bei  $\alpha$ , um die Länge der Decklinerentfernung für  $\beta$  zu erhalten:

$$l_\beta = \pi \cdot d \cdot \left( \frac{180^\circ - (180^\circ - \gamma - \alpha)}{180^\circ} \right) \quad (3.38)$$

### 3.5.4 Ergebnisse

Die hier beschriebenen Formeln zur Berechnung der Längen von  $a$  und  $c$  führen direkt zum Ergebnis, da die benötigten Werte  $d$ ,  $x$  und  $y$  bereits von Beginn an gegeben sind. Der Wert  $d$  und der rechte Winkel  $\gamma$  sind ebenfalls grundlegend definiert. Die Ergebnisse für  $b$ ,  $l_\alpha$  und  $l_\beta$  sind durch Umstellung der vorgenannten Formeln mit den ermittelten Zwischenergebnissen zu berechnen. Daraus resultieren die aufgezeigten finalen Rechenschemas. Sämtliche Ergebnisse sind in die vereinfachte Formel 3.29 einzusetzen und führen zur Gesamtbreite der Wabenplatte sowie allen Teilanschnitten der Abwicklung.

Alle Formeln sind in händischen Berechnungen anzuwenden. Es empfiehlt sich jedoch nicht, da die Einzelberechnungen einen erheblichen und nicht zeitgemäßen Aufwand bedeuten. Deshalb wird hier auf die Darstellung verzichtet wird. Eine sinnvolle Anwendung stellt deshalb die automatisierte Berechnung mithilfe von Computerprogrammen dar, welche nachfolgend erläutert werden.

### 3.5.5 Digitale Anwendung der Rechenschemas

Die Berechnung der einzelnen Werte mithilfe von Software erleichtert den Umgang mit den Zwischenergebnissen. Ziel ist die automatisierte Ausgabe der Ergebnisse nach Eingabe der gewünschten Bauteilabmessungen und der zur Verfügung stehenden Plattendimensionen. Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei Anwendungsszenarios erläutert. Mit dem Programm Microsoft Excel sind die Daten in einer Tabellenumgebung einzufügen und die gewünschten Ergebnisse werden mithilfe hinterlegter Formel ausgegeben. Wird eine parametrische Ausgabe der Werte gewünscht, so können die Berechnungen beispielsweise mit dem Programm Rhinoceros und dem Plugin Grasshopper durchgeführt werden, was eine graphische und vektorbasierte Ausgabe der Ergebnisse ermöglicht. Nachfolgend werden zwei Anwendungsvorschläge mit diesen Programmen skizziert und beziehen sich auf grundlegend definierte Daten, welche vom Anwender gegeben werden. Diese Daten sind:

1. Breite der Wabenplatte
2. Materialstärke der Wabenplatte
3. gewünschte Breite des Bauteils
4. gewünschte Höhe des Bauteils

Nach Definition dieser Parameter können die Daten in eines der beiden vorgeschlagenen Programme eingelesen werden. Die automatisierte Berechnung erfolgt im Hintergrund und gibt die gewünschten Werte als Zahlenwerte oder als graphische Anzeige aus.

#### Mathematische Berechnung mit Microsoft Excel

Um dem Produzenten des Bauteils die exakten Daten zur Entfernung des Deckliners mittels Fräse zu ermöglichen, werden die Breite und die Positionierung von  $l_\alpha$  und  $l_\beta$  benötigt. Die hierfür notwendigen Rechenschritte werden im vorhergehenden Kapitel erläutert und finden nun Anwendung in den Tabellenzellen der Excel-Datei. Die Einspeisung erfolgt durch Angabe der Bauteilparameter in mm.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	<b>1. Bauteilabmessungen</b>				<b>2. Werte</b>				<b>3. Ergebnisse</b>		
2	Breite der Wabenplatte	1260 mm			a	140,0 mm			Breite der Gesamtabwicklung	1167 mm	
3					b	172,0 mm					
4	Materialstärke d	30 mm			c	100,0 mm			Überschreitung der Plattenbreite	Nein	
5					la	75,6 mm					
6	Bauteilbreite x	320 mm			lβ	65,7 mm			Breite der Restfläche	93 mm	
7					α	35,5 °					
8	Bauteilhöhe y	200 mm			β	54,5 °			Bauteil produzierbar ?	Ja	

**Abbildung 3.36:** Excel-Tabelle zur Berechnung der Fräsbereiche – das Bauteil ist produzierbar

### Material und Methoden

Abbildung 3.36 zeigt die dreiteilige Tabellenoberfläche, anhand eines Beispiels mit der Bauteilbreite 320mm und der Bauteilhöhe 200mm bei einer Plattenbreite von 1260mm und einer Materialstärke von 30mm. Die drei Bereiche entsprechen den drei Hauptgruppen der Bauteilabmessungen (1), der Werte (2) und der Ergebnisse (3).<sup>49</sup>

### Durchführung

Zunächst sind die Ausgangswerte vom Anwender in Spalte B einzutragen. Sie definieren die gegebenen Rohstoffdimensionen der Plattenbreite und der Materialstärke sowie die gewünschte Breite und Höhe des Bauteils. Die berechneten Zwischenergebnisse sowie die benötigten Winkel werden in Bereich 2 (Spalte E – G) übersichtlich aufgelistet. Die Endergebnisse der benötigten Plattenbreite und eventuelle Über- bzw. Unterschreitungen derselben werden in Bereich 3 (Spalte I – K) ausgegeben. Abhängigkeiten zwischen den Zellen bewirken wertende Aussagen über die generelle Produzierbarkeit des Bauteils unter den gegebenen Abmessungen. Die Ausgabe “Ja” zeigt eine Realisierbarkeit und gibt die Breite der Restfläche an. Die Ausgabe “Nein” zeigt eine Überschreitung der zur Verfügung stehenden Plattenbreite und stellt diese Größe ebenfalls dar.

### Ergebnisse

Die Spalten J und K arbeiten in Abhängigkeit zueinander und geben je nach berechnetem Ergebnis die Produktionsempfehlung aus. Das hier gezeigte Bauteil ist mit den gegebenen Materialparametern produzierbar. Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 3.37 die Eingabe von alternativen Bauteildimensionen bei gleicher Plattenbreite und -dicke. Dieses Bauteil ist unter den gegebenen Umständen nicht aus einer Wabenplatte herzustellen.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	<b>1. Bauteilabmessungen</b>				<b>2. Werte</b>				<b>3. Ergebnisse</b>		
2	Breite der Wabenplatte	1260 mm			a	240,0 mm			Breite der Gesamtabwicklung	1515 mm	
3					b	256,3 mm					
4	Materialstärke d	30 mm			c	90,0 mm			Überschreitung der Plattenbreite	255 mm	
5					l $\alpha$	83,5 mm					
6	Bauteilbreite x	300 mm			l $\beta$	57,9 mm			Breite der Restfläche		mm
7					$\alpha$	20,6 °					
8	Bauteilhöhe y	300 mm			$\beta$	69,4 °			Bauteil produzierbar ?		Nein

**Abbildung 3.37:** Excel-Tabelle mit alternativen Eingaben – das Bauteil ist nicht produzierbar

Zur exakten Berechnung benötigt Excel eindeutige Formeldefinitionen. Da das Programm Winkel mittels Bogenmaß errechnet, sind die Ergebnisse von Zellen mit der Funktion *ARCTAN* mit Quotienten aus 180 und  $\pi$  zu multiplizieren. Sämtliche notwendigen Formeln der Excel-Zellen sind in Tabelle 4.7 auf Seite 206 aufgeführt.

<sup>49</sup>verwendete Programmversion: Microsoft Excel für Mac 2011, Version: 14.5.1 (150515)

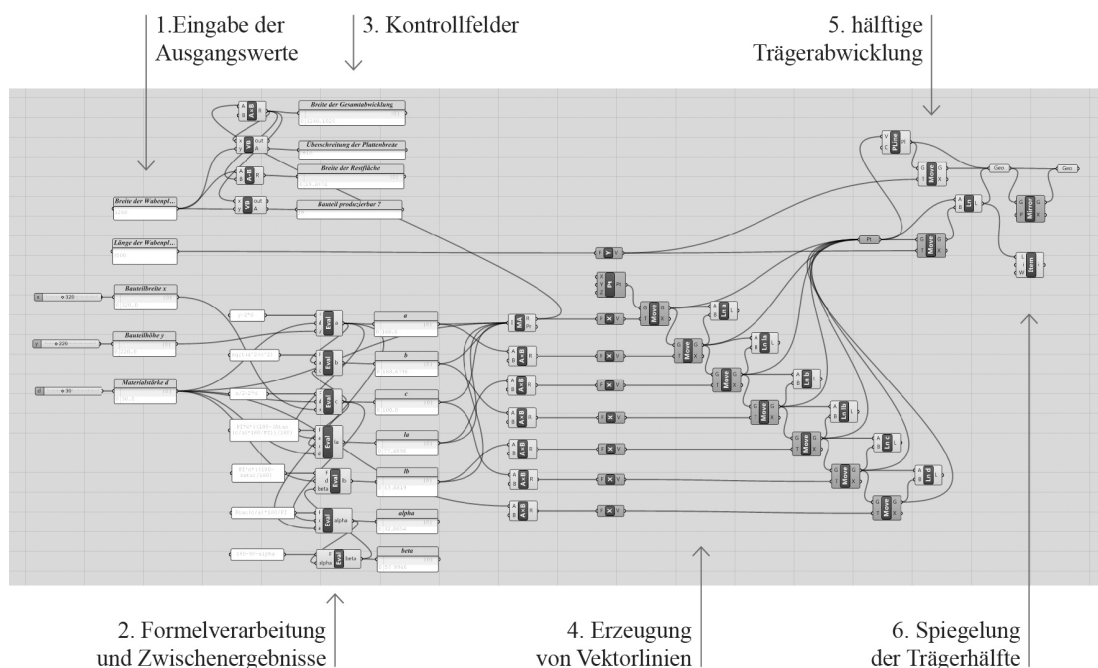


### Parametrische Berechnung mit Rhinoceros und Grasshopper

Die oben erläuterten Rechenschritte und die Verarbeitung mit Excel führen zu zufriedenstellenden Einzelergebnissen, welche in weiteren Arbeitsschritten anzuwenden sind, um eine Trägergeometrie zu erhalten. Auch die Kontrolle über die Produzierbarkeit des Bauteils im Rahmen der gegebenen Bauteildimensionen funktioniert fehlerlos. Eine vollständige Abwicklung der gewünschten Geometrie ist jedoch nicht möglich. An dieser Stelle setzt das Programm *Rhinoceros* der Firma McNeel und das Plugin *Grasshopper* an.<sup>50</sup> Zunächst verarbeitet diese Programmkombination die Eingaben ebenso wie Excel, ist jedoch in weiteren Schritten in der Lage, die Geometrie abzuwickeln und die Daten zurück an das Programm Rhinoceros zu übermitteln. Dort wird eine Fräsvorlage generiert, welche mithilfe eines Austauschformats (z.B. dxf) an den Produzenten der Wabenplatten übergeben wird.

### Material und Methoden

Im Plugin Grasshopper werden die parametrischen Zusammenhänge mithilfe von Verknüpfungspfaden visualisiert. Für die Eingabe der gegebenen Werte, die Berechnung der Zwischenschritte und die Ausgabe der Abwicklung kommt eine gesamte Grasshopper-Definition zum Einsatz. Sie ist in Abbildung 3.38 ersichtlich und zeigt sechs Teilbereiche, deren einzelne Rechenabschnitte im Anschluss erläutert werden. Durch den symmetrischen Aufbau des Bauteils wird eine Berechnung der hälftigen Abwicklung möglich, welche am Ende der Definition durch Spiegelung verdoppelt wird.



**Abbildung 3.38:** Ansicht der gesamten Grasshopper-Definition

<sup>50</sup>verwendete Programmversionen: Rhinoceros, Version: 5 SR11 64-bit (5.11.50226.17195, 26.02.2015); Grasshopper, Version: August-27, 2014 (Build: 0.9.0076)

Die Teilbereiche, welche in Abbildung 3.38 markiert sind, bauen aufeinander auf und sind logisch zu erschließen. Die Punkte 1 – 3 sind deckungsgleich mit den Rechenschritten aus der Excel-Tabelle. Hier findet die Parametrisierung des Bauteils statt. Die Punkte 4 – 6 erzeugen aus diesen Werten jene Vektoren, welche für die Fräsvorlage benötigt werden. Die graphische Ausgabe erfolgt durch Rhinoceros und erlaubt eine visuelle Begutachtung der erzeugten Datei. Die Teilbereiche der Definition sind wie folgt aufgebaut:

### Eingabe der Ausgangswerte

Die Eingabe erfolgt über fünf Felder, welche aus der Exceltabelle bekannt sind. Da Breite und Länge der Wabenplatte durch die Abmessungen der zur Verfügung stehenden Maschinen begrenzt sind, werden sie als *harte* Vorgaben bezeichnet und sind in die ersten beiden Felder einzutragen. Im Gegensatz dazu sind die *weichen* Werte (Bauteilhöhe, Bauteilbreite und Materialstärke) ohne Probleme anzupassen, weshalb ein Schieberegler installiert ist, der die bequeme Einstellung der gewünschten Werte erlaubt. Die linke Abbildung zeigt die Felder und ihre Positionen.

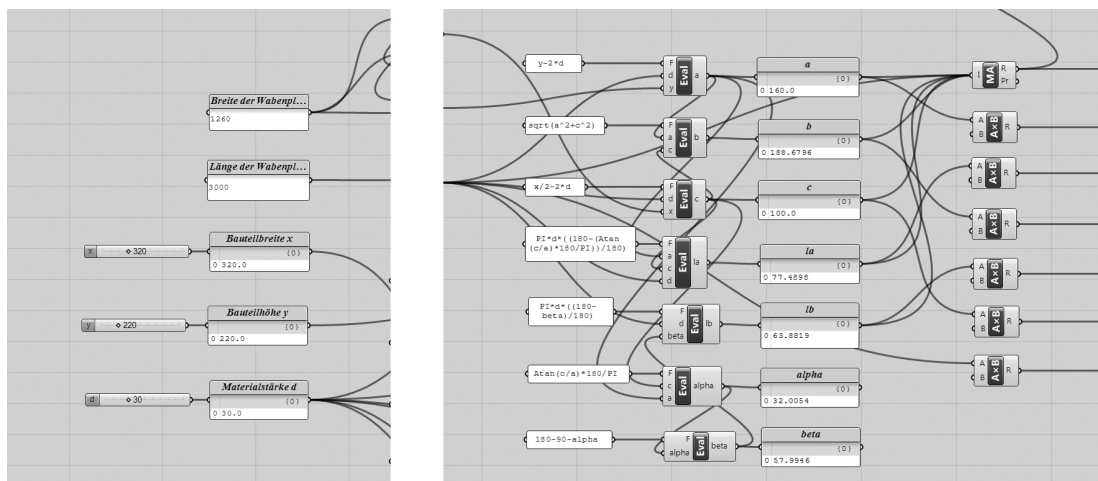


Abbildung 3.39: Eingabe der Ausgangswerte (links) und Formelverarbeitung (rechts)

### Formelverarbeitung und Zwischenergebnisse

Nach Eingabe der Ausgangswerte erfolgt die sofortige Berechnung der Zwischenergebnisse. In der rechten Abbildung sind die zugehörigen Elemente grün eingefärbt. Links sind die hinterlegten Formeln mithilfe von Panels dargestellt. Die Evaluierungsobjekte in der Mitte führen die Berechnungen nacheinander durch und beziehen sich dabei auf die oben erläuterten Rechenschritte. Rechts daneben werden die ermittelten Zwischenergebnisse ebenfalls in Panels angezeigt, welche mit den jeweiligen Abschnitten der Trägerabwicklung bezeichnet sind. Sie erlauben die Ablesung von einzelnen Teilwerten und ermöglichen so einen Überblick über die durchgeführten Rechenschritte.

### Kontrollfelder

Die logischen Verbindungen der einzelnen Definitionsglieder in Grasshopper sind in der Lage, die resultierenden Ergebnisse mit den gegebenen Werten abzugleichen. Das erste Feld in Abbildung 3.40 links erlaubt die schnelle Kontrolle, welche Gesamtbreite die Abwicklung unter den gemachten Eingaben haben wird. Das zweite Panel beantwortet die Frage nach einer Überschreitung der Plattenbreite mit “Ja” oder “Nein”. Dieses Feld könnte beispielsweise auch mit einer farbigen Codierung versehen werden und mit Rot anzeigen, dass die Breite überschritten wird. Ist die Abwicklung schmäler als die Platte, bleibt ein Reststreifen übrig, dessen Breite im dritten Feld angegeben ist. Die generelle Aussage, ob ein Bauteil produzierbar ist, wird im vierten Anzeigefeld ausgegeben. Das erste und das dritte Feld geben somit Werte in Millimetern aus, während das zweite und das vierte Feld in reziproker Verbindung zueinander stehen.

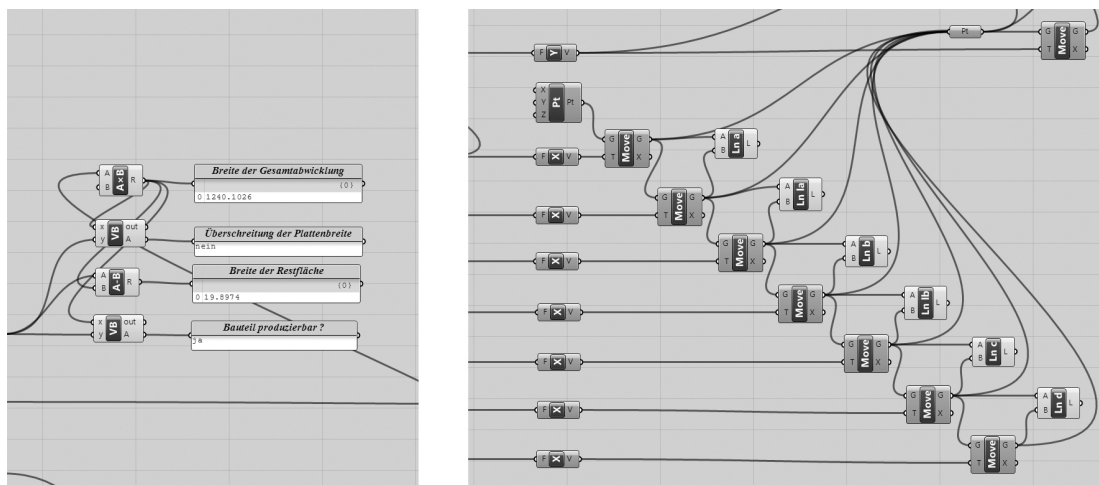


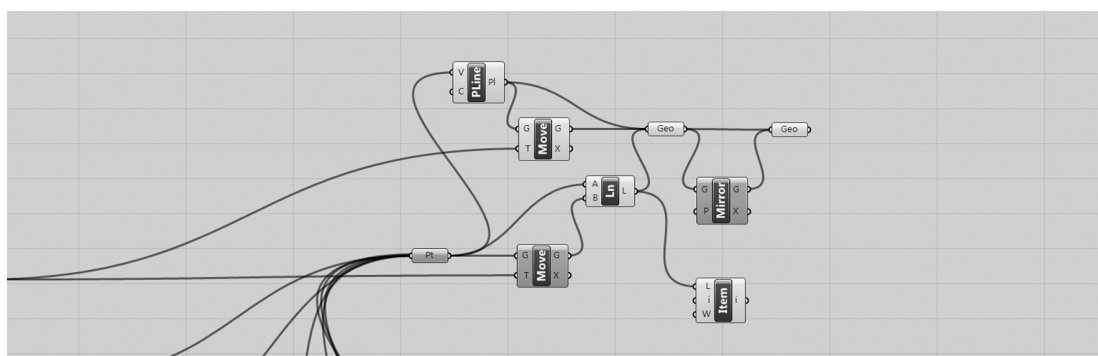
Abbildung 3.40: Kontrollfelder (links) und Erzeugung von Vektorlinien (rechts)

### Erzeugung von Vektorlinien

Die ermittelte Abwicklung stellt geometrisch betrachtet eine Sequenz von aufeinanderfolgenden Linien dar, deren jeweilige Anfangs- und Endpunkte mit eindeutig definierten Vektoren auf einer Achse (hier: x-Achse) zu beschreiben sind. Abbildung 3.40 rechts zeigt die Kaskade aus Punkten, deren Positionen aus den in Bereich 2 ermittelten Werten hervorgehen. Jeder Punkt steht dabei für einen Ort auf der Achse und definiert somit das Ende einer Linie und zugleich den Anfang einer anderen. Die ankommenden Werte stehen alle in einem engen Zusammenhang und bedingen sich gegenseitig. Die dadurch erzeugte Verlängerung oder Verkürzung durch das *Move-Objekt* hat somit direkte Auswirkungen auf die Position des jeweiligen Nachbarvektors. Da alle Linien liegen auf der x-Achse liegen, bilden sie eine Gesamtlinie, deren Länge der Breite der Abwicklung entspricht.

## Abwicklung eines hälftigen Trägers

Die erläuterten Linien haben lediglich eine Ausdehnung in Richtung x und sind mit einem Punkt zu erfassen. Die lineare Abwicklung wird nun in Richtung y um die Länge der Wabenplatte verschoben. Es entstehen rechtwinklige Flächen, welche entweder über einen Deckliner verfügen oder über eine Decklinerentfernung. Abbildung 3.41 zeigt den Informationseingang über einen einzigen Punkt sowie die Länge der Wabenplatte. Das nachgeschaltete *Move-Objekt* bezieht seine Tiefeninformationen direkt vom zweiten Eingabefeld des ersten Teilbereiches. Die Abwicklung dehnt sich nun in zwei Dimensionen aus und verfügt über eine Unterteilung seiner Fläche, wie sie auch für das spätere Bauteil benötigt wird.



**Abbildung 3.41:** hälftige Abwicklung (links) und Spiegelung der Trägerhälfte (rechts)

## Spiegelung

Die vorliegenden Informationen decken lediglich eine Hälfte der Abwicklung ab, da es sich bei dem parametrisierten Bauteil um ein symmetrisches Element handelt. Deshalb ist das Ergebnis der Berechnungen an der y-Achse zu spiegeln. Dies geschieht mithilfe des *Mirror-Elements* welche die geometrischen Informationen an der definierten Position doppelt. Das gespiegelte Objekt ist eine Instanz und repliziert sämtliche Interaktionen des Originals. Dadurch entsteht eine ganzheitliche Abwicklung des Bauteils. Die Informationen der parametrisch gewonnenen Geometrie werden nun zurück nach Rhinoceros gesendet. Dort wird das Ergebnis als ebene Fläche dargestellt, welche von linearen und parallel verlaufenden Vektoren gegliedert wird. Werden beide Programmbildschirme parallel geöffnet, so ist die direkte Veränderung der Ergebnisfläche nach Änderung der Ausgangswerte zu erkennen.

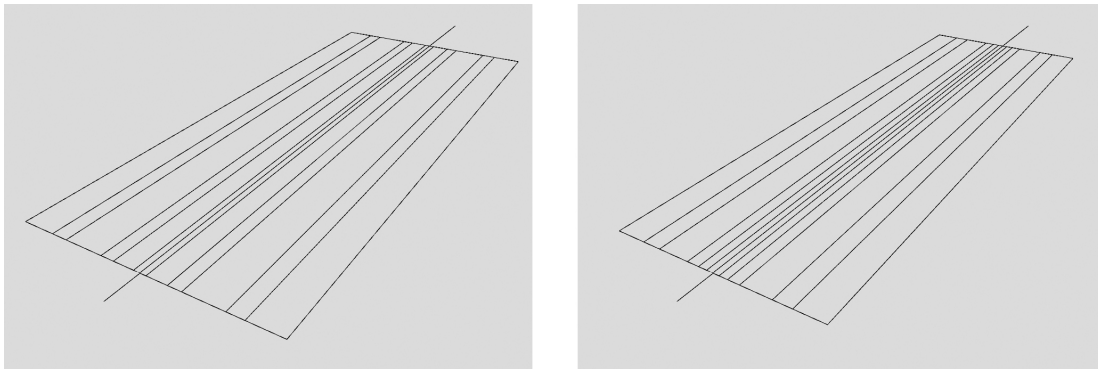
## Durchführung

Das Grasshopper-Plugin wird innerhalb von Rhinoceros gestartet und die gewünschten Ausgangswerte sind in den Eingabefeldern einzutragen oder mit den Schiebereglern einzustellen. Sofort ändert sich das Ergebnis im Sichtfenster von Rhinoceros.

#### Ergebnisse

Die Darstellung entspricht der Oberfläche einer Wabenplatte, welche über vier längliche Fräsbereiche verfügt. Die x-Achse stellt den Beginn der hälftigen Abwicklung dar, welche sich entlang der y-Achse entwickelt. Ist das gewünschte Ergebnis erzielt worden, wird die erzeugte Geometrie mit der *Bake-Funktion* festgehalten. Parametrische Änderungen sind nun nicht mehr möglich. Anschließend ist die Datei für den Datenexport vorzubereiten und an den Produzenten der Wabenplatten zu übergeben.

Die Abwicklung eines Trägers mit den Abmessungen 320 x 220mm ist in Abbildung 3.42 links dargestellt. Demgegenüber zeigt die rechte Grafik ein Bauteil mit den Maßen 200 x 200mm. Die Mittelachse wird aus der Fläche herausgeführt, um die Spiegelung aufzuzeigen. Sehr gut sind die ungleichen Breiten der Elemente sowie die unterschiedlichen Positionen der Fräsbereiche zu erkennen.

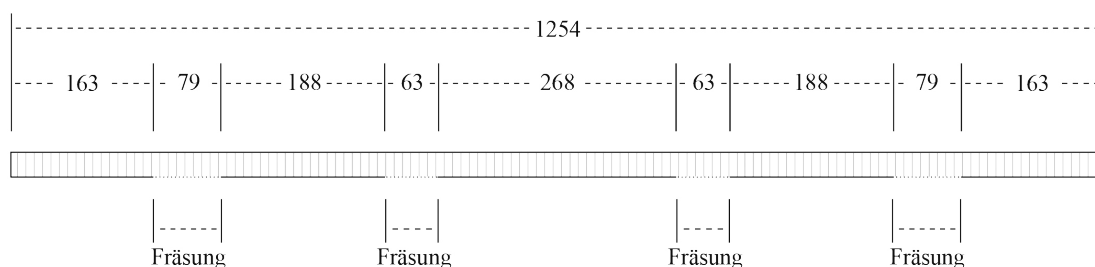


**Abbildung 3.42:** Darstellung von zwei Abwicklungen in Rhinoceros

Die Generierung der Abwicklung erfolgt auf eine äußerst einfache Weise und liefert sehr gute Ergebnisse. Die sofortige Ausgabe der Ergebnisse ohne umständliche Kompilierung erleichtert die Bewertung unterschiedlicher Querschnitte. Dadurch können dem Produzenten wertvolle Planungshilfen für eine optimierte Fertigung an die Hand gegeben werden, denn bei sachgerechter Anwendung entsteht kein Verschnitt mehr. Als vorteilhaft hat sich die Entwicklung der zugrunde liegenden Rechenschemas sowie der Parametrisierung mit Excel herausgestellt. Dadurch können bereits erprobte Arbeitsweise auf die Umgebung der 3D-Software und seines parametrischen Plugins übertragen werden. Dies reduziert Fehlerquellen enorm und hat sich bestens bewährt. Die präsentierte Lösung ist leicht für andere Bauteilquerschnitte zu adaptieren, sofern die notwendigen Rechenschritte erarbeitet werden.

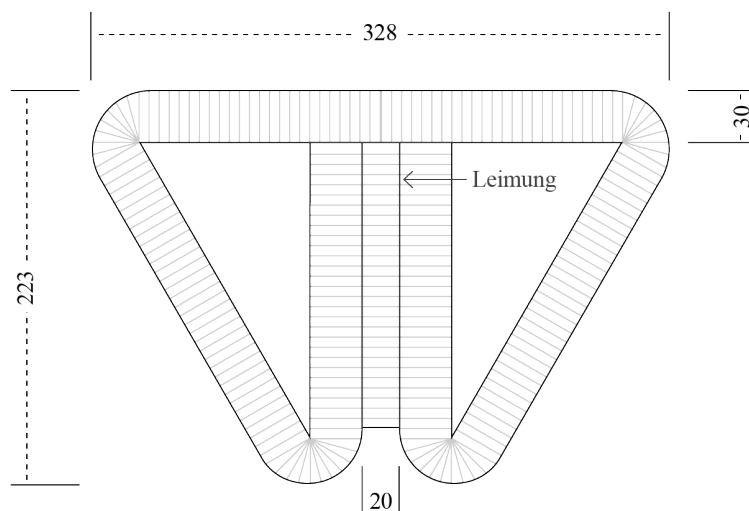
### 3.5.6 Abwicklung eines Trägers mit Zwischensteg

Die oben erläuterte Vorgehensweise zur Abwicklung wird nachfolgend an einem Trägerbauteil überprüft, welcher als Prototyp herzustellen ist. Als Besonderheit verfügt dieses Element über einen zwischen den Schenkeln eingeschobenen Steg, wie er in Abbildung 3.25 auf Seite 114 an Beispiel 6 dargestellt ist. Dieser Steg bietet eine enorme Flexibilität, da er zur Ertüchtigung von Rahmenecken ebenso dient wie für den Anschluss von weiteren Bauteilen. Nach Definition des Querschnitts und der Materialstärke von 30mm erfolgt die Formfindung und Berechnung der äußeren Abmessungen des Bauteils. Die Gesamtbreite der Geometrie die maximale Breite der zur Verfügung stehenden Wabenplatte voll aus. (Siehe Kapitel 2.5.2) Die Abmessungen der Abwicklung sind Abbildung 3.43 zu entnehmen.



**Abbildung 3.43:** Abwicklung der Wabenplatte, Abmessungen in mm (ohne Maßstab)

Der Wabenplatte werden vier längsseitig verlaufende Streifen des Deckliners entfernt. Deren Breite ist von dem Innenwinkel der jeweiligen Faltung abhängig und wird in Kapitel 3.3.8 ausführlich beschrieben. Das gefaltete Bauteil ist Abbildung 3.44 zu entnehmen.

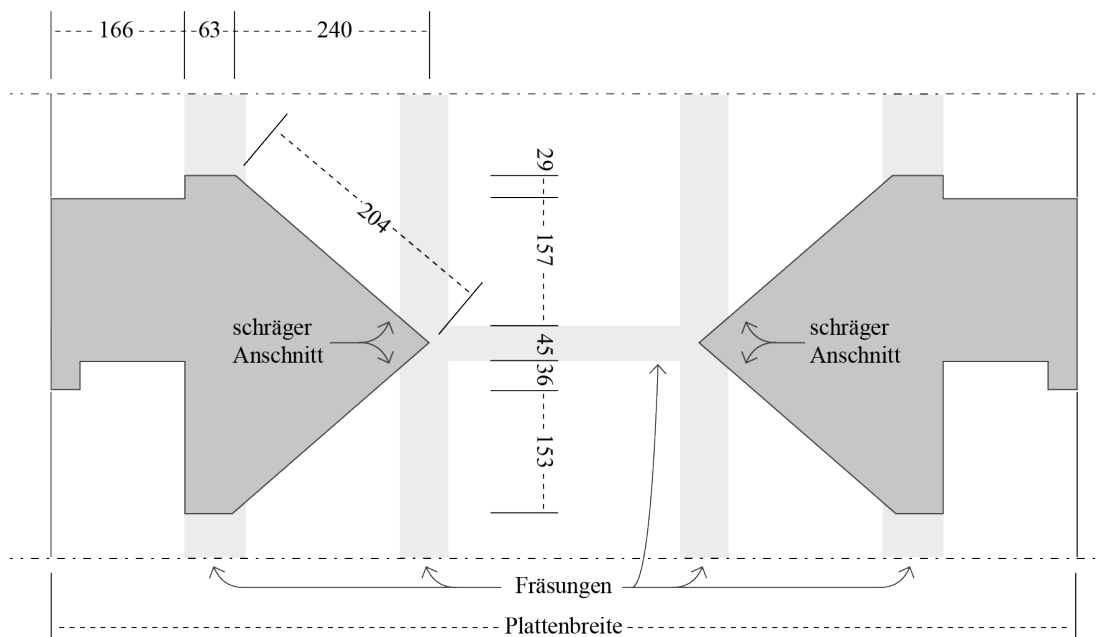


**Abbildung 3.44:** Rahmenquerschnitt des Experimentalbaus auf Basis eines gleichseitigen Dreiecks, Abmessungen in mm (ohne Maßstab)

Durch Umfaltung der äußeren beiden Schenkelflächen und Einklappung zu einer dreieckigen Querschnittsform entsteht der gewünschte Träger aus Abbildung 3.44. Die ganzflächige Verklebung des Profils mit wasserdichtem Weißleim erzeugt ein äußerst verwindungssteifes Bauteil mit hohen Festigkeitswerten. Die Herstellung eines Trägers mit der Maximallänge von 3130mm erfolgt mithilfe von Spanngurten, welche die zu verklebenden Schenkelflächen aneinander pressen. Zur Ermittlung der Bauteilabmessungen ist die oben beschriebene Exceltabelle heranzuziehen, welche genaue Ergebnisse zur Produktion liefert. Hierbei ist anzumerken, dass die Materialstärke des eingeschobenen Stegs bei der Bemaßung der Plattenbreite zu berücksichtigen und auf die Gesamtbreite hinzufügen ist.

#### Entwicklung eines Knotenpunktes für das Rahmenprofil

Die Faltung in Querrichtung der Wabenplatte erzeugt ein Tragelement, dass mindestens die Länge der ursprünglichen Wabenplatte aufweist. Ein solches Bauteil auf Basis eines gleichseitigen Dreiecks ist nun in die zweite Dimension zu falten, um ein eine Rahmenecke mit einem Winkel von  $90^\circ$  zu erzeugen. Durch Einschnitt und Herausnahme bestimmter Polygonzüge wird die Wabenplatte in die zweite Dimension gefaltet, um den rechten Winkel des Eckbauteils zu generieren. Dies wird möglich, wenn die nach außen zeigende Fläche des Profils durchläuft und die Restbereiche der Platte im Bereich der Abkantung so ausgespart werden, sodass sich der Rahmenwinkel automatisch einstellt. Abbildung 3.45 zeigt die dunkel eingefärbten Bereiche einer Wabenplatte, welche zu entfernen sind.



**Abbildung 3.45:** Plattenausschnitte zur Erzeugung des rechtwinkligen Eckprofils

Die beiden diagonalen Schnittkanten sind in einem bestimmten Winkel anzuschrägen, da sich die Stirnkanten nicht rechtwinklig treffen. Die Berechnung dieses Winkels wird nachfolgend beschrieben. Die restlichen Schnitte sind rechtwinklig zur Oberfläche der Platte auszuführen. Die Länge der Schenkel des Eckbauteils sind beliebig definierbar und werden nur durch die Längenausdehnung der Wabenplatte begrenzt. Die Lage der beiden diagonalen Einschnitte zueinander sorgt hierbei für den finalen Winkel des Bauteils. Stehen sie steiler zueinander, resultiert ein Eckelement  $<90^\circ$ . Nach Faltung der bearbeiteten Wabenplatte in Quer- und Längsrichtung wird das gewünschte Eckdetail mit einem rechten Winkel erzeugt. Abbildung 3.46 zeigt dessen Ansichten.

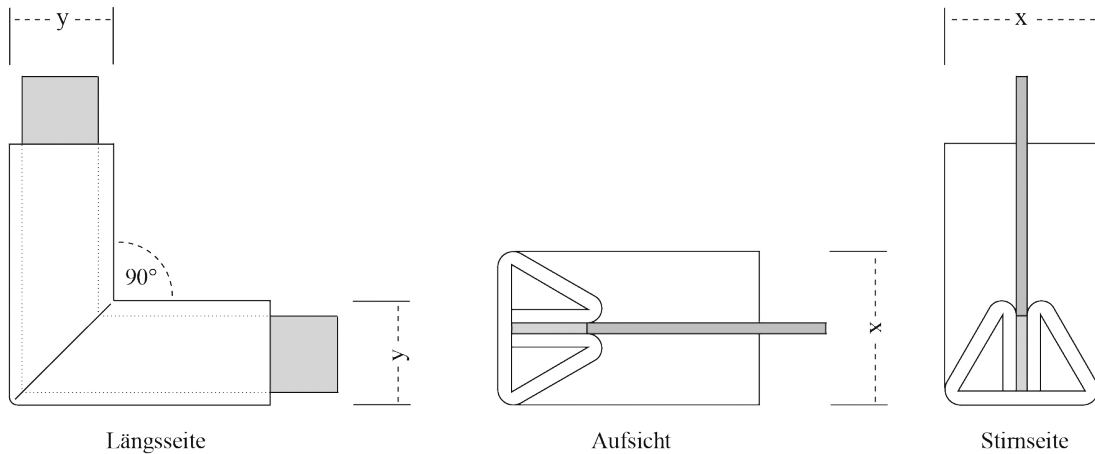


Abbildung 3.46: Ansichten des Eckprofils

#### Rechenschemas zur Ermittlung des Schenkelwinkels $\gamma$

Da der Querschnitt des Knotenpunktes ein gleichseitiges Dreieck aufweist, gestaltet sich die Generierung des Eckelements schwieriger, als bei einem rechteckigen Querschnitt.<sup>51</sup> Abbildung 3.47 links zeigt den Knotenpunkt in der Isometrie. Die beiden sich schräg treffenden Schenkelflächen sind rot eingefärbt. Zur Ermittlung des Winkels  $\gamma$  zwischen den Schenkelflächen wird ein Quader herangezogen, welcher in der Isometrie in der Abbildung als Punktlinie eingezeichnet ist und rechts daneben vergrößert dargestellt wird. Dieser Quader ist durch die drei Seitenlängen  $a$ ,  $b$  und  $c$  definiert. Die Seiten  $a$  und  $b$  sind identisch, denn sie entsprechen der Höhe des Bauteils  $y$ . Hinzu kommt die dritte Seite  $c$ , welche der hälftigen Breite des Querschnitts  $\frac{x}{2}$  entspricht.

$$a = b = y \quad (3.39)$$

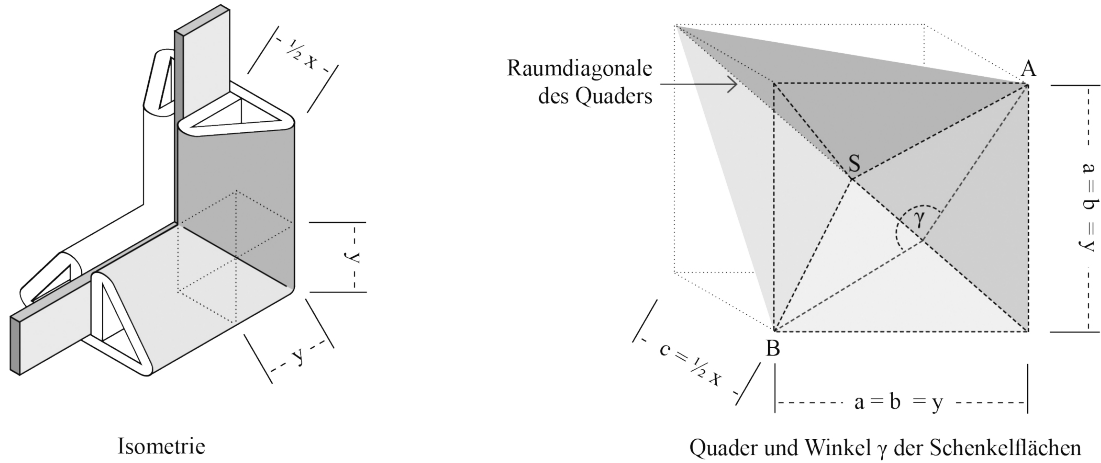
$$c = \frac{x}{2} \quad (3.40)$$

<sup>51</sup>Würde ein rechteckiger Querschnitt vorliegen, entspräche der Schnittwinkel  $45^\circ$  und die Länge der Quadratdiagonale  $d_Q$  ergäbe sich aus der Formel  $d_Q = a \cdot \sqrt{2}$ .



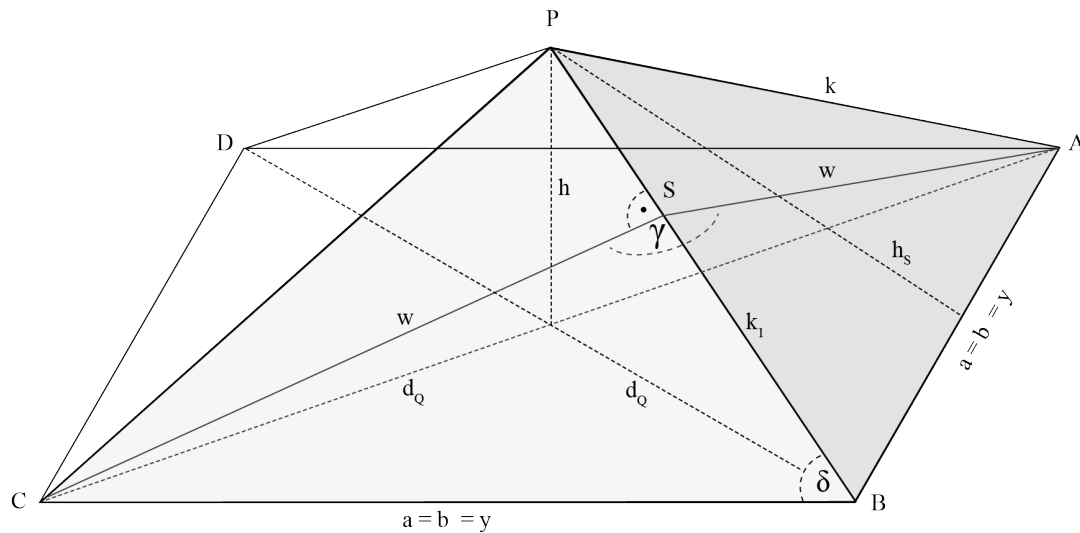
Die Quadratdiagonale  $d_Q$  der Quadergrundfläche entsteht zwischen den Punkten  $\overline{AC}$  und  $\overline{BD}$ . Sie ist folgendermaßen zu ermitteln:

$$d_Q = a \cdot \sqrt{2} \quad (3.41)$$



**Abbildung 3.47:** Isometrie (links) und Quader zur Berechnung der Schenkelwinkel (rechts)

Für die weiteren Rechenschritte ist die Winkelherleitung einer Pyramide hilfreich. Deren Grundfläche entspricht jener des Quaders und das Winkelverhältnis zwischen zwei Pyramiden Seiten ist identisch mit dem gesuchten Winkel  $\gamma$  zwischen den Schenkelflächen des Bauteils. Die Pyramiden Seiten sind in Abbildung 3.47 eingefärbt. Zur Verdeutlichung zeigt Abbildung 3.48 die Pyramide auf ihrer Grundfläche stehend und mit Kennzeichnung aller Längen und des gesuchten Winkels  $\gamma$ .



**Abbildung 3.48:** Pyramidendarstellung mit Angabe aller notwendigen Längen und Winkel

Die Höhe  $h$  der Pyramide entspricht der hälftigen Quaderhöhe  $c$  und somit einem Viertel der Bauteilbreite. Dies ermöglicht die direkte Beschreibung eines Zusammenhangs von  $x$  und  $h$  in folgender Formel:

$$h = \frac{c}{2} = \frac{x}{4} \quad (3.42)$$

Die Achse, welche den Kontakt zwischen den sich schräg schneidenden Schenkelflächen des Knotenpunkts markiert, ist die Raumdiagonale des Quaders. Auf ihr liegt die Seitenkante  $k$  der Pyramide. Ihre Länge ist mit dem Satz des Pythagoras aus der hälftigen Quadratdiagonale  $d_Q$  und der Höhe  $h$  der Pyramide zu ermitteln. Nach Implementierung von 3.42 und der Vereinfachung ergibt sich:

$$k = \sqrt{\left(\frac{x}{4}\right)^2 + \left(\frac{d_Q}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{x^2}{16} + \frac{d_Q^2}{4}} \quad (3.43)$$

Durch Ermittlung von  $k$  ist mithilfe der Grundflächenkante  $a$  der Pyramide und dem Kosinus der Eckenwinkel  $\delta$  der Seitenfläche zu errechnen:

$$\delta = 180^\circ - \arccos\left(1 - \frac{k^2}{2a^2}\right) \quad (3.44)$$

In Abbildung 3.48 wird deutlich, dass die Seitenkante  $k$  der Pyramide durch den Punkt  $S$  geteilt wird. Er bildet den Eckpunkt des gleichschenkligen Dreiecks, das von der Quadratdiagonalen  $d_Q$  sowie den beiden Strecken  $\overline{AS}$  und  $\overline{CS}$  gebildet wird. Diese beiden Strecken sind mit  $w$  bezeichnet, stehen orthogonal zur Kante  $k$  und schließen den gesuchten Winkel  $\gamma$  ein. Um die Länge von  $w$  zu erhalten, ist der Sinus von  $\delta$  umzustellen:

$$\sin\delta = \frac{w}{a} \quad (3.45)$$

$$w = a \cdot \sin\delta \quad (3.46)$$

Mithilfe von  $w$  ist es abschließend möglich, den Winkel  $\gamma$  mithilfe der Quadratdiagonale  $d_Q$  zu berechnen. Hierfür wird die Formel für ein gleichschenkliges Dreieck angewendet:

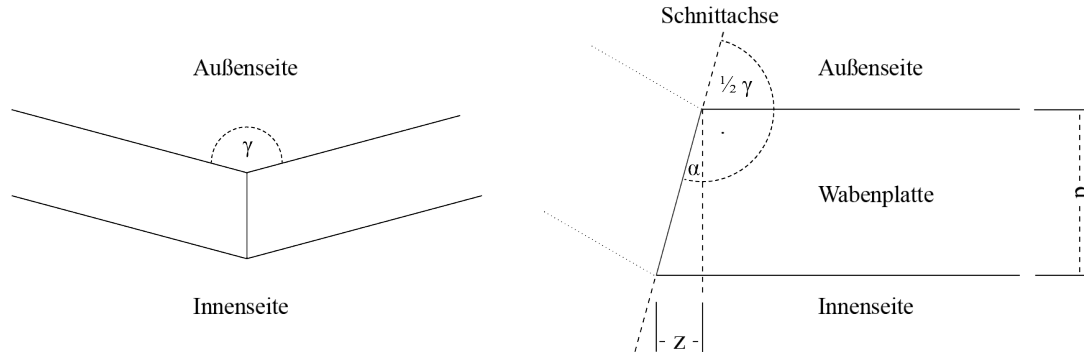
$$\gamma = \arccos\left(1 - \frac{d_Q^2}{2 \cdot w^2}\right) \quad (3.47)$$

Die Berechnungen für das Ausgangsbauteil mit einer Breite von 328mm und einer Höhe von 223mm ergeben für den gesuchten Winkel zwischen den Schenkeln:

$$\gamma = 150,6^\circ \quad (3.48)$$

**Rechenschemas zur Ermittlung des Schnittwinkels  $\alpha$** 

Zur Anfertigung der schrägen Schnittkante an der Wabenplatte ist der notwendige Winkel  $\alpha$  und die damit einhergehende Verbreiterung der Ausschnittsdimension  $z$  zu ermitteln.



**Abbildung 3.49:** Zusammenhang zwischen Winkel  $\gamma$  und der Schnittkante in der Wabenplatte

Abbildung 3.49 zeigt die Schenkelflächen des Eckprofils, welche sich an der oben beschriebenen Raumdiagonale im Winkel von  $150,6^\circ$  treffen. Die schräge Schnittkante für den Plattenausschnitt in Abbildung 3.45 wird erreicht, indem die Ausschnittsfläche am inneren Deckliner um den Wert  $z$  verbreitert wird. Er ist abhängig von der Materialstärke  $d$  und dem Schnittwinkel. Dieser wird ermittelt, indem der hälftige Winkel  $\gamma$  und der rechte Winkel von  $180^\circ$  abgezogen werden:

$$\alpha = 180^\circ - 90^\circ - \frac{\gamma}{2} = 14,67^\circ \quad (3.49)$$

Anschließend ist  $z$  über den Tangens von  $\alpha$  zu berechnen. Die Materialstärke  $d$  steht als Ankathete von  $\alpha$  zur Verfügung:

$$\tan \alpha = \frac{z}{d} \quad (3.50)$$

$$z = d \cdot \tan \alpha = 7,9 \text{ mm} \quad (3.51)$$

Der berechnete Wert wird auf 8mm aufgerundet und zu dem Polygonzug des Ausschnitts in Abbildung 3.45 hinzugerechnet. Parallel zu den Berechnungen durchgeführten Materialstudien an Modellen im Maßstab 1:1 und vergleichende CAD-Simulationen Program bestätigen das Ergebnis. Die geometrisch ermittelten Werte stimmen exakt mit den Modellstudien überein. Die entwickelten Rechenschemas erlauben die Berechnung von Schnittwinkeln, welche sich durch abweichende Querschnittsgeometrien ergeben. Wird die Produktion unterschiedlicher Bauteilquerschnitte in Erwägung gezogen, so sind auch diese Rechenschemas leicht in eine Excel-Tabelle zu übertragen. Denkbar ist die automatische Ausgabe des Schnittwinkels und der dafür nötigen Verbreiterung des Ausschnitts.

### Mathematische Berechnung mit Microsoft Excel

Die in Kapitel 3.5.5 vorgestellte Exceltabelle zur parametrischen Erfassung der Bauteildimensionen von Trägern dient als Vorlage für eine zweite Tabelle, welche den Schenkelwinkel  $\gamma$  und die Ausschnittsverbreiterung  $z$  ausgibt. Hierfür sind in der zweiten Spalte folgende Zellen einzusetzen, welche die Zwischenergebnisse berechnen:

1. Quadratdiagonale  $d_Q$
2. Pyramidenhöhe  $h$
3. Pyramidenseitenkante  $k$
4. Eckenwinkel  $\delta$  der Seitenfläche
5. Dreiecksseite  $w$
6. Schnittwinkel  $\alpha$

Die Ergebnisspalte ist um die Zellen des Schenkelwinkels  $\gamma$  und der Ausschnittsverbreiterung  $z$  zu erweitern. Dort werden die benötigten Werte ausgegeben. Abbildung 3.50 zeigt die Oberfläche der Tabelle anhand des oben beschriebenen Bauteils mit einer Breite von 328mm und einer Höhe von 223mm.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	1. Bauteilabmessungen				2. Werte				3. Ergebnisse		
2	Materialstärke d	30 mm			dQ	315,4 mm			Schenkelwinkel $\gamma$	150,6 °	
3					h	82,0 mm					
4	Bauteilbreite x	328 mm			k	177,7 mm			Ausschnittsverbreiterung z	7,9 mm	
5					$\delta$	133,0 °					
6	Bauteilhöhe y	223 mm			w	163,0 mm					
7					$\alpha$	14,7 °					

**Abbildung 3.50:** Erweiterte Excel-Tabelle zur Berechnung von Schenkelwinkel  $\gamma$  und Ausschnittsverbreiterung  $z$

Die in den Zellen hinterlegten Formeln sind Tabelle 4.8 auf Seite 206 zu entnehmen. Auch hier ist auf die Rechenweise des Programms Excel hinzuweisen, da es die erforderlichen Winkel mittels Bogenmaß ermittelt. Somit sind Zellen, welche die Funktion *ARCCOS* nutzen, mit dem Quotienten aus 180 und  $\pi$  zu multiplizieren.

## 4 Anwendung der Forschungsergebnisse

Die Erforschung von Faltungen in Wabenplatten und die daraus entwickelten statisch wirksamen Bauteile stellen die Entwurfsgrundlage für die Planung eines Experimentalpavillons dar. Er dient der realitätsnahen Anwendung und dauerhaften Überprüfung der entwickelten Geometrien, denn gelingt die Eindämmung oder sogar Eliminierung der Nässe sensitivität von Bauteilen aus Papierwerkstoffen, drängt sich deren Einsatz als konstruktive und lastableitende Bauteile im architektonischen Kontext geradezu auf. In diesem Kapitel wird die Konzeption, die detaillierte Planung und die Realisierung des Bauwerks *OpenSource: Cardboard* erläutert. Anschließend erfolgt die Beschreibung und Auswertung des nach der Fertigstellung eingeleiteten Monitorings zur Evaluierung des Gebäudes.

Um die Forschungsergebnisse thematisch einzuordnen und die Basis für einen experimentellen Pavillon aus Papierwerkstoffen zu legen, wird eine vertiefte Recherche zu bereits realisierten Architekturen dieses Themengebiets durchgeführt. Der Stand der Wissenschaft und Technik ist als heterogen zu beschreiben und manifestiert sich in Einzelprojekten verschiedener Forschungs- und Studienprojekte. Deren textliche und bildliche Beschreibung in belastbaren Quellen ist als mangelhaft einzustufen, da durch die häufig sehr kurze Standzeit lediglich Einzelaspekte in wissenschaftlichen Abhandlungen aufbereitet werden. In der Regel werden derartige Projekte ausschließlich durch Quellen im Internet verbreitet und halten nur selten Einzug in die schwarze Literatur. Gleichwohl wird nachfolgend der Versuch einer Kategorisierung anhand von Beispielen unternommen.

### 4.1 Recherche zum Stand von Wissenschaft und Technik

Für die erfolgreiche Realisierung eines Architekturprojektes liefert neben der notwendigen Grundlagenforschung und der Bewertung der einzusetzenden Werkstoffe auch eine Analyse des aktuellen Standes der Technik wertvolle Informationen. Da sich in einer Recherche sehr viele unterschiedliche Projekte herausfiltern lassen, bietet sich eine Kategorisierung an, welche sich auf die unten erläuterten Analyseparameter stützt. Die Projekte sind alle aus Wellpappe oder Wabenplatten aus Wellpappe realisiert. Die unterschiedlichen Einsatzgebiete am Objekt sowie die Standzeit der Konstruktion haben dabei einen entscheidenden Einfluss auf die Bewertung.

### 4.1.1 Analyseparameter

Elemente aus Papierwerkstoffen eignen sich hervorragend zur Produktion von Architekturmodellen in sämtlichen Größen bis hin zum begehbaren Maßstab 1:1. Die Vorteile liegen in der leichten Bearbeitung mit einfachsten Werkzeugen, dem geringen Gewicht der Elemente sowie den günstigen Anschaffungskosten. Als nachteilig ist der dringend notwendige Schutz gegen starke Feuchte und Nässe einzuordnen. Dieser ist mit konstruktiven oder chemischen Methoden sicherzustellen. Eine Betrachtung realisierter Projekte unterliegt deshalb einer Kategorisierung in mehreren Hierarchiestufen. Diese Abgrenzung erlaubt einen differenzierten Blick auf realisierte Projekte und ermöglicht die Einordnung der vorliegenden Forschungsleistung. Dafür werden die drei Parameter des *Konstruktionsprinzips*, der *Standzeitdauer* und der *Nässeresistenz* benötigt. Zunächst ist zu unterscheiden, ob die Konstruktion des analysierten Projektes aus ungefalteten, flächigen Platten oder aus gänzlich gefalteten Elementen aus Papierwerkstoffen besteht. Kombinationen beider Formen sowie Konstruktionen aus Pappröhren bilden als Sonderformen eine dritte Kategorie. Hinsichtlich der Standzeit sind *temporäre* oder *dauerhafte* Beispiele zu differenzieren. In den meisten Fällen ist bei Architekturen aus Papierwerkstoffen von einer temporären Standzeit auszugehen, denn wenige Beispiele sind für einen dauerhaften Einsatz konzipiert. Die genauere Betrachtung der Fassade lässt Rückschlüsse auf eine vorhandene bzw. nicht vorhandene *Nässeresistenz* zu. Bei dauerhaften Beispielen wird von einer vorhandenen und permanenten Nässeresistenz ausgegangen, welche mit konstruktiven oder chemischen Mitteln sichergestellt wird. Abbildung 4.1 verdeutlicht die Zusammenhänge in einem Organigramm und schlüsselt sechs Typologien auf. Dadurch sind die Konstruktionsprinzipien leicht ablesbar. Jeder Variante wird ein Architekturbeispiel zugeordnet und tiefergehend erläutert.

Formfaktor	Standzeit	Nässeresistenz	Konstruktionsprinzip	Projekt
flächige Elemente	temporär	nein	→ Schale	→ 1. <b>Packed Pavillon</b>
		ja	→ Rahmen	→ 2. <b>Cardboard House</b>
	dauerhaft	ja	→ Platten	→ 3. <b>L'ilot carton</b>
gefaltete Elemente	temporär	nein	→ frei gefaltete Fassade	→ 4. <b>Cardboard Banquet</b>
		ja	→ dynamische Faltfassade	→ 5. <b>Instant Homes</b>
	dauerhaft	ja	→ parallel gefaltete Fassade	→ 6. <b>Cardboard School</b>
Kombinationen und Sonderformen	temporär	nein	→ gefaltete Träger / Stützen	→ 7. <b>Foldlife Pavillon</b>
		ja	→ addierte Röhren	→ 8. <b>Disaster Shelters</b>
	dauerhaft	ja	→ gefaltete Rahmen	→ 9. <b>OpenSource: Cardboard</b>

**Abbildung 4.1:** Kategorisierung und Beispiele von Architekturen aus Papierwerkstoffen

### 4.1.2 Architekturbeispiele

Die erläuterten Wege der Analyse von realisierten Bauten erlauben die einfache Kategorisierung von publizierten Architekturprojekten. Die acht ausgewählten und nachfolgend beschriebenen Beispiele zeigen die gestalterische und konstruktive Vielseitigkeit von Architekturbauteilen aus Papierwerkstoffen auf und bilden den analytischen Rahmen zur Beschreibung des Experimentalbaus *OpenSource: Cardboard*.

#### 1. Packed Pavilion (Shanghai, China)

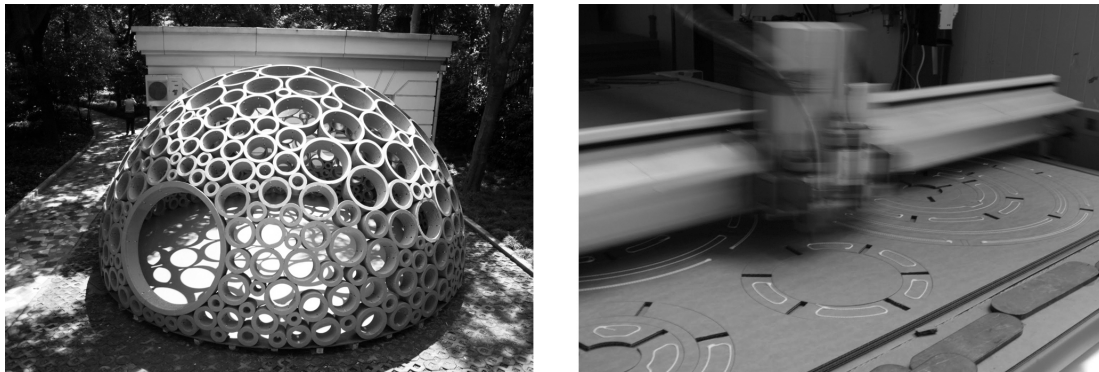


Abbildung 4.2: Packed Pavilion auf der Shanghai world EXPO 2010

Am Department of Computer Aided Architectural Design (CAAD) an der ETH Zürich wurde von Teilnehmern der Master Advanced Study Group ein Pavillon entwickelt, welcher die Möglichkeiten computergesteuerter Planung und Fertigung in einem gebauten Prototypen eindrucksvoll veranschaulicht. Unter der Leitung von Tom Pawlofsky plante eine studentische Gruppe einen halbkugelförmigen Bau, dessen Schale in unterschiedlich große, ringförmige Segmente auf Basis von Kegelstümpfen gegliedert ist. Die ringförmigen Elemente haben alle die gleiche Materialstärke und Ringbreite. Sie sind an ihren Kontaktstellen mithilfe von Kabelbindern verbunden. Die Konstruktion besteht aus 409 flächigen Elementen, welche jeweils aus 28 Schichten verklebter Wellpappe bestehen. Durch Verringerung des Durchmessers jeder einzelnen Schicht und die CAD-gesteuerte Verklebung konnte die Kegelform der Elemente realisiert werden. (siehe Abb. 4.2 rechts)

Nach der computergestützten Planung und Vorfertigung in der Schweiz erfolgte der Aufbau und die Präsentation im Rahmen der *3D paperArt exhibition* im Shanghai Museum of Arts and Crafts zur Shanghai world EXPO 2010. Obwohl die einzelnen Ringe mit einer Folie vor Nässe geschützt sind, ist der Pavillon in die Kategorie *Projekt aus flächigen Elementen mit temporärer Standzeit und nicht vorhandener Nässe-resistenz* einzuordnen. Grund hierfür ist die besondere Struktur der Fassade, welche durch die großflächigen Öffnungen keinen Schutz vor Niederschlag bietet. Auch die mit Kabelbindern realisierten Kontaktstellen zwischen den Ringen sind nicht gänzlich vor Wassereintritt gesichert.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Webseite: [www.packed-pavilion.blogspot.de](http://www.packed-pavilion.blogspot.de), Abruf am 15.05.2015 [LCZ<sup>+</sup>10]

## 2. Cardboard House (Sidney, Australien)

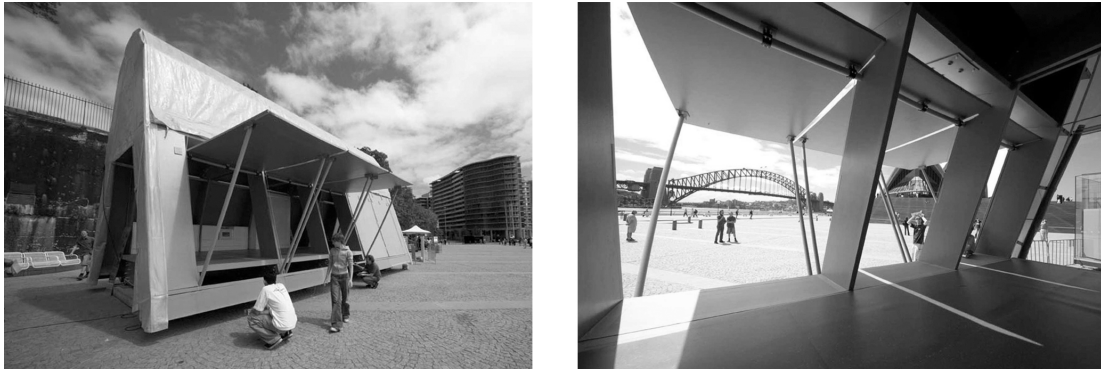


Abbildung 4.3: Cardboard House

Im Jahr 2004 wurde von Stutchbury & Pape Architects in Kooperation mit der Ian Buchan Fell Housing Research Unit der Universität Sidney das *Cardboard House* realisiert. Anhand dieses Projektes wurde demonstriert, wie sich die Architekten ein günstiges Gebäude (Kosten: 35.000 \$) auf Basis vollständig recycelbarer Materialien vorstellen, dass innerhalb weniger Stunden zu errichten ist und die Grundbedürfnisse der Bewohner trotzdem zu erfüllen vermag. Ähnlich eines gespiegelten Schiffsrumpfes bilden Träger aus Wabenplatten eine Struktur aus Spanten, welche als Zangenkonstruktion ausgeführt sind. Die Rahmen nehmen in Längsrichtung gesteckte Nebenträger auf, an denen Fassadenplatten aus Wellpappe befestigt sind. Der Witterungsschutz wurde mit einer passend bearbeiteten und leicht zu montierenden Folie realisiert.

Durch den Einsatz leicht zu montierender Steckverbindungen konnte die Konstruktion in flach verpackten Einheiten an jedem beliebigen Ort montiert und demontiert werden. Große Paneele an den Längsseiten werden nach oben geklappt werden und bieten so einen effizienten Sonnenschutz bei gleichzeitiger Erweiterung des Innenraums und einer kühlenden Querlüftung.

Anzumerken ist, dass dieses Gebäude im subtropischen Klima sicherlich ohne Probleme funktioniert und die großzügigen Öffnungen vor allem in heißen Gebieten gut einzusetzen sind. Eine Adaption für feuchtere Gebiete scheint mit dem gezeigten Design nur schwer umsetzbar. Die Kombination strukturell tragender Bauteile und flachen Fassadenelementen kommt einem gesamtheitlichen Gestaltungsanspruch sehr nahe. Leider wurden nach derzeitigem Kenntnisstand keine Folgeprojekte aus dieser Idee entwickelt.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup>Kottas, D.: New Trends in Microarchitecture, Linksbooks, 2014, S. 296. [Kot14]



### 3. L'îlot carton (Belle-Île, Frankreich)



Abbildung 4.4: L'îlot carton

Das Projekt L'îlot carton zeigt den vollflächigen Einsatz von Wabenplatten aus Wellpappe als Baumaterial an einem Gebäude. Auf der Insel Belle-Île-en-mer vor der Küste Westfrankreichs wurde das erste Gebäude seiner Art in Frankreich errichtet und dient Touristen der Insel als Ferienhaus. Als holzverschalter Anbau führt das Gebäude die Formensprache des Bestands fort. (siehe Abb. 4.4 links) Wichtige tragende Funktionen des Gebäudes werden zwar noch von konventionellen Holzstützen und -trägern übernommen, doch konnte der überwiegende Teil der Wand- und Dachkonstruktion aus Wabenplatten hergestellt werden. Diese übernehmen nicht nur die Funktion der statischen Aussteifung sondern auch der Wärmedämmung. Die Konstruktion wird als Leichtbau klassifiziert und widersteht den starken Winden auf der Insel ebenso gut wie Gebäude in herkömmlicher Bauweise.

Durch die Dichte der Konstruktion konnte auch der notwendige Brandschutznachweis geführt werden. Die vorgefertigten Wabenplatten bestehen aus einer 22cm starken Schichtung aus Wellpappe mit kompletter Kaschierung sämtlicher Stirnkanten und einer umlaufenden Folie aus Polyethylen zum Schutz vor Feuchte. Die Elemente mit einer Masse von  $55 \text{ kg/m}^2$  besitzen bereits ab Werk die notwendigen Winkelzuschnitte für den Übergang von Dach- in Wandfläche und wirken als vollflächige Wärmedämmebene. Ihre Montage erfolgt durch Einschub zwischen die Holzständerkonstruktion und beidseitiger Aufbringung von 18mm OSB-Platten. Darauf erfolgte die Installation einer hinterlüfteten Holzverschalung mithilfe von Konterlattungen.<sup>3</sup>

Dieses Projekt zeigt eindrucksvoll den langfristigen Einsatz von Bauteilen aus Papierwerkstoffen im architektonischen Kontext. Sämtliche Veröffentlichungen attestieren die Wirksamkeit der Konstruktion, was auch durch den erfolgreichen Betrieb des Gebäudes untermauert wird.<sup>4</sup>

<sup>3</sup>Laville, G.: Écologique, économique et robuste: la première maison en carton est construite à Belle-Île-en-mer, in: Castors magazine, 2014, S. 24. [Lav14]

<sup>4</sup>Biju, S.: Une maison tout en carton, c'est du solide?, in: Habitat Naturel, Ausgabe 56, S. 40. [Bij14]

#### 4. Cardboard Banquet (Cambridge, Vereinigtes Königreich)



**Abbildung 4.5:** Der temporäre Pavillon auf dem Gelände der Universität von Cambridge

Im Jahr 2009 wurde der temporäre Wellpappen-Pavillon *Cardboard banquet* von Studierenden des Department of Architecture an der University of Cambridge geplant und errichtet. Für eine Festveranstaltung zum Semesterstart war ein temporäres Gebäude zu planen, welches innerhalb kürzester Zeit errichtet werden kann. Die Struktur des Pavillons bildete sich durch gegensinnige Faltung flacher Wellpappen. Die begrenzten Abmessungen dieser Platten erforderte die Fügung mit handelsüblichen Kabelbindern.

Die technische Origami-Faltung ist in der Lage, einen Kurvenverlauf im Grundriss zu tolerieren und reagiert darauf mit unterschiedlichen Höhen im Schnitt. Die Struktur erlaubt ebenfalls die völlige Schließung des Pavillons an einer der beiden Stirnseiten durch umklappen der letzten Faltelemente. Die Vorfertigung der Faltelemente erfolgte innerhalb von drei Tagen und der Aufbau durch das studentische Team gelang innerhalb weniger Stunden. Abbildung 4.5 zeigt die punktuelle Fügung der gefalteten Elemente mit Kabelbindern. Ihr Einsatz wurde kritisch hinterfragt, erlaubte jedoch die schnellste und effizienteste Art der Bauteilverbindung.<sup>5</sup>

Die Abbildungen zeigen eine interessante Struktur, welche durch leichte Abänderung der Faltungen einen Kurvenverlauf beschreibt. Der temporäre Charakter wird durch die wiederlösbaren Verbindungen sowie den völligen Verzicht einer wetterfesten Fassadenkonstruktion unterstrichen. Es ist nicht bekannt, ob das Bauwerk nach der Nutzung eingelagert oder entsorgt wurde.

---

<sup>5</sup>Webseite: [www.pleatfarm.com/2009/11/09/cardboard-banquet-cambridge-university](http://www.pleatfarm.com/2009/11/09/cardboard-banquet-cambridge-university), Abruf am 15.05.2015 [Sur09]

## 5. Instant Homes (Darmstadt, Deutschland)



**Abbildung 4.6:** Instant Homes - faltbare Notunterkünfte

Das Forschungsprojekt *Instant Homes* ist eine interdisziplinäre Kooperation der Fachbereiche Architektur, Maschinenbau und Chemie an der TU Darmstadt. Das erklärte Ziel ist die Entwicklung einer faltbaren und damit leicht zu verschiffenden Notunterkunft aus Wellpappe, die für einen Preis von ca. 2.000 Euro zu produzieren ist.

Der erste Prototyp des Projektes offenbart den Anspruch der Forscher an eine schnell zu errichtende Unterkunft. Die flach gefaltete Konstruktion soll sich nach seinem Transport in die Krisenregion leicht und ohne Hilfsmittel entfalten lassen. Zur Ertüchtigung des Bauwerks werden verschiedene Materialstärken und Faltgeometrien untersucht. Bei einer Höhe von 2,20 Metern betragen die Abmessungen des Gebäudes 5,80 x 2,28 Meter.

Als flaches Paket ist die Konstruktion in einem Container leicht an den Bestimmungsort zu transportieren. Ohne weitere Stützen fangen die Wandelemente sämtliche Kräfte ab. Die Nässeresistenz wird mithilfe von Polymilchsäure realisiert. Die derzeitige Forschung sieht Versuche mit unterschiedlichen Beschichtungen vor. Diese sollen der Notunterkunft brandhemmende, atmungsaktive und antibakterielle Eigenschaften verleihen. Dadurch soll die derzeit noch temporäre Notunterkunft zur dauerhaften Nutzung ertüchtigt werden.<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup>Mink, M.: Architekten entwickeln ein Haus zum Falten, in: Die Welt, Abruf am 15.05.2015 [Min15]

## 6. Cardboard School (Westcliff-on-Sea, Vereinigtes Königreich)



Abbildung 4.7: West Borough Primary School und der Wandaufbau

*Cottrell Vermeulen Architecture* planten in Kooperation mit *Buro Happold* einen Erweiterungsbau der Westborough Primary School als weltweit ersten permanenten Bau aus Papierwerkstoffen und konnte ihn nach weniger als einjähriger Realisierungsphase im Jahr 2001 einweihen. Ziel war der Einsatz von 90% Recyclingmaterialien, welche nach einem geplanten Lebenszyklus von 20 Jahren vollständig in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden sollen. Die Wabenplatten sind als mehrschichtiges Honigwaben-Sandwich aufgebaut. Die äußeren und inneren Deckliner haben eine Stärke von 6mm und kaschieren eine dreischichtige Wabenstruktur mit jeweils 50mm Stärke und dazwischen liegenden Trennschichten aus Pappe mit 2mm. Die Paneele besitzen eine Abmessung von 2 x 1,50m und sind stirnseitig mit Bauhölzern gerahmt. Dadurch wird die einfache Fügung der Elemente und die Aussteifung der Wandflächen erreicht. Die Abmessungen des Gebäudes betragen 15 x 6 Meter. Die teilweise gefalteten Wandkonstruktionen, das gefaltete Dach und die Stützen sind gänzlich aus Papierwerkstoffen realisiert.<sup>7</sup>

Zum Schutz der Wabenplatten wurden die Innenseiten mit einer wasser- und dampfdichten Kunststoffschicht überzogen. Zur zusätzlichen Ertüchtigung des Materials gegen Feuchtigkeit wurden der Pulpe vor der Produktion zur Wabenplatte wasserabweisende Zusätze beigemischt und die äußere Pappschicht mit einer wasserdichten Folie verkleidet.<sup>8</sup> Die abschließende wasserführende Schicht der Außenfassade besteht aus Eternitplatten. Durch die Dichte der Bauteile wird ein sehr träges Brandverhalten erreicht. Dabei wird die Oberfläche verkohlt und schützt den Kern vor den Flammen.<sup>9</sup> Der innovative Einsatz der Materialien führte zur vielfachen Auszeichnung des Projektes. Als erste Gebäude konnte es den *RIBA Journal Sustainability Award* gewinnen und dient als Inspiration für viele Nachfolgeprojekte.<sup>10</sup>

<sup>7</sup>Eekhout, M. (Hrsg.) et al.: *Cardboard in Architecture*, S. 27 und S. 125. [EVV08]

<sup>8</sup>Lane, T.: Here's one we made earlier, in: *Building*, Webseite: [www.building.co.uk/heres-one-we-made-earlier/1005227.article](http://www.building.co.uk/heres-one-we-made-earlier/1005227.article), Abruf am 17.05.2015 [Lan01]

<sup>9</sup>Weitere Fakten zu dem Projekt sind in den Artikeln von Burnett [Bur03] und Barker [Bar03] zu finden.

<sup>10</sup>Bildnachweis: AJ Buildings Library, Webseite: [www.ajbuildingslibrary.co.uk/download.php?id=77341](http://www.ajbuildingslibrary.co.uk/download.php?id=77341)

## 7. Foldlife Pavilion (Venedig, Italien)



**Abbildung 4.8:** Foldlife Pavilion auf der 10. Architekturbiennale in Venedig

Die Firma *Foldlife* entwickelt Möbel aus Wellpappe und Wabenplatten, die sich durch eine einfache Handhabbarkeit auszeichnen, durch Bedruckung individualisieren lassen und vollständig recycelbar sind. Für die 10. Internationale Architekturbiennale in Venedig<sup>11</sup> im Jahr 2006 gestalteten die Designer einen einfachen Pavillon in Würfelform aus Wellpappe für ihr Heimatland Lettland. Kennzeichnend für den Entwurf ist die Kombination einfacher Trägergeometrien auf Basis gleichschenkliger Dreiecke welche durch einfache Laschenverbindungen miteinander verknüpft werden. Die Gliederung der Seitenflächen in neun quadratische Flächen erlaubt eine Reduzierung der Spannweite der flächigen Ausfüllungen und ordnet die Struktur der sekundären Tragelemente. Diese sind durch Steckverbindungen mit dem umlaufenden Rahmen einer jeden Seitenfläche gefügt und stellen die Aussteifung in Kombination mit den flächigen Elementen sicher. Die Rasterstruktur ist außen ablesbar und erlaubt Aussparungen für Fenster- und Türöffnungen. Die Anzahl der ausgefüllten Elemente wird von der jeweiligen Nutzung definiert und erlaubt eine Anpassung an die Umgebungsbedingungen. Auch durch einfache Rotation des Körpers sind unterschiedliche Nutzungsszenarien und Erscheinungsformen realisierbar.

Über eine wasserresistente Fassade oder ein Fundament verfügt der Pavillon nicht, da er ausschließlich für den Innenbereich konzipiert wurde. Deshalb wurde auf eine Imprägnierung oder Beschichtung verzichtet. Die einfache Wellpappenkonstruktion verdeutlicht, wie leicht eine Raumdefinition durch Faltung tragender Elemente realisierbar ist. Durch das extrem geringes Gewicht ist ein Transport des gesamten Pavillons mit wenigen Helfern machbar. (siehe Abb. 4.8 rechts) Der Foldlife Pavilion zeigt sehr anschaulich, wie mit einfachen Mitteln und einem klugen Konstruktionssystem eine stadträumliche Interaktion innerhalb eines kurzen Zeitraums zu erreichen ist.<sup>1213</sup>

<sup>11</sup>Titel der Biennale: Convertible City – Formen der Verdichtung und Entgrenzung

<sup>12</sup>Die Entwicklung und Realisierung erfolgte innerhalb von 60 Tagen.

<sup>13</sup>Webseite: [www.foldlife.lv](http://www.foldlife.lv), Abruf am 15.05.2015 [Car15]

## 8. Paper Log Houses (Kobe, Japan; Kaynasli, Türkei; Bhuj, Indien)



**Abbildung 4.9:** Notunterkünfte *Paper Log Houses* für die Opfer des Erdbebens in Kobe, Japan

Shigeru Ban, Träger des Pritzkerpreises 2014, entwickelte eine einfache und leicht zu montierende Wohneinheit als flexibel einzusetzende Notunterkunft für Opfer von Naturkatastrophen. Auf einem Fundament aus beschwerten Getränkeboxen wird ein quadratischer Raum durch Addition sich direkt berührender Pappröhren errichtet. Diese Röhren haben einen Durchmesser von 108mm bei einer Wandstärke von 4mm. Der Zwischenraum wird mittels eines selbstklebenden Dichtbandes überbrückt. Eine einfache PVC-Plane bildet den Dachabschluss. Dessen Stirnseiten werden an heißen Tagen zur Luftzirkulation geöffnet und bilden im Winter bei geschlossenem Zustand eine Pufferzone. Nach dem verheerenden Erdbeben in Kobe (Japan) im Jahr 1995 konnte innerhalb kürzester Zeit eine ganze Siedlung dieser Unterkünfte errichtet werden. (siehe Abb. 4.9 links) Die vorfabrizierten Bauteile sind mit Schrauben zu verbinden. Das Gebäude mit einer Grundfläche von 4 x 4 Metern bietet einer Familie den nötigsten Platz und ist für unter 2.000\$ zu errichten.

Eine Weiterentwicklung der Konstruktion konnte Ban in Kaynasli (Türkei) errichten, nachdem dort im Jahr 1999 ein Erdbeben ganze Landstriche verwüstete. Die rechteckige Grundform mit den Abmessungen 3 x 6 Meter basiert auf dem gleichen Prinzip wie die japanischen Vorbilder. Die Dachabdichtung wird mittels Tarpulin-Planen realisiert. Aufgrund eines erhöhten Bedarfs an Wärmedämmung wurden die Röhren mit Altpapier gefüllt. (siehe Abb. 4.9 mitte) Im Jahr 2001 wurde Indien durch das schlimmste Erdbeben in der Geschichte des Landes getroffen. Auch hier konnte eine Siedlung mit Notunterkünften innerhalb kürzester Zeit errichtet werden. Die tonnenförmigen Dächer aus Bambus zitieren die örtliche Bautradition und überdachen eine Grundfläche von 3,20 x 4,90m. (siehe Abb. 4.9 rechts) Die stirnseitige Weiterführung des Daches schafft einen Eingangsbereich und schützt vor Sonneneinstrahlung. Die natürliche Ventilation erfolgt durch Löcher in den Bambusgeflechten unterhalb der Tonne. Alle drei Projekte zeigen eindrucksvoll das Potential dieser Konstruktion und ihre Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Umweltbedingungen.<sup>14</sup>

<sup>14</sup>McQuaid, M.: Shigeru Ban, S. 34ff. [McQ03]

### 4.1.3 Kategorisierung

Die Analyse realisierter Bauten und dem damit beleuchteten Stand der Technik zeigt die vielfältigen Optionen im Bauen mit Papierwerkstoffen. Diese ersetzen herkömmliche Elemente in bestimmten Bereichen des Bauwerks unter kontrollierten Bedingungen. Dabei erweist sich die hervorragende Ökobilanz von recycelten Papierprodukten als wichtiges Argument für deren Einsatz. Der gegenwärtige Horizont lässt sich auf eine überschaubare Anzahl von Projekten eingrenzen. Unter der Voraussetzung, dass die Elemente nicht von Feuchtigkeit oder Nässe beeinflusst werden, sind Röhren aus Pappe sehr gut als Ersatz für Holzstützen und Wabenplatten aus Wellpappe als Fassadentafeln einsetzbar. Dabei sind für Papierwerkstoffe zwei Einsatzgebiete zu unterscheiden: *lastabtragende* und *bauklimatisch wirksame* Elemente.

#### Lastabtragende Papierwerkstoffe

Zur dieser Gruppe sind vor allem jene Rundstützen aus Vollpappe zu zählen, die in den Bauten von Shigeru Ban (Abb. 4.10 links)<sup>15</sup>, Cottrell & Vermeulen (Abb. 4.10 mitte)<sup>16</sup> oder dem Institut für Hochbautechnik an der Fakultät für Architektur an der TU Delft (Abb. 4.10 rechts)<sup>17</sup> eingesetzt wurden, um die strukturelle Integrität zu wahren und statische Kräfte abzuleiten.



Abbildung 4.10: Paper House, Cardboard School, KCPK Multished (v.l.n.r.)

#### Bauklimatisch wirksame Papierwerkstoffe

Der zweiten Gruppe gehören Produkte an, welche im Bausektor als Wärmedämmung oder als Kernmaterial in Sandwichelementen zum Einsatz kommen. Beispielhaft seien hier einige etablierte Produkte mit Dämmwirkung genannt. Für die Innendämmung bietet die Firma *Unger-Diffutherm* eine innovative Dämmplatte an, die aus einem Zellulose-Wabenkern besteht, der auf eine Holzfaserplatte aufkaschiert wird. Die Hohlräume erhöhen die Dämmwirkung und die Holzfasern sorgen für die Wärme- und Feuchtespeicherung. (siehe Abb. 4.11 links)<sup>18</sup> Die Firma *Betz Holzbau* vertreibt mit dem Zellstoffverbundelement (ZVE) eine Wärmedämmplatte, welche durch ihre gegensätzliche Verleimung mit Kartoffelstärke besonders ökologisch ist, keinerlei Schadstoffe absondert und problemlos zu montieren ist.

<sup>15</sup>Ban, S.: Paper House, Yamanashi (Japan) in: Jodidio, P: Building a new Millennium, S. 81ff. [Jod99]

<sup>16</sup>Barker, D.: House of Card, in: <http://www.architectureweek.com>, Abruf am 19.05.2015. [Bar03]

<sup>17</sup>Eekhout, M. (Hrsg.) et al.: Cardboard in Architecture, S. 29. [EVV08]

<sup>18</sup>vgl. Zeitschrift Detail green, Ausgabe 01/15, S. 88. [DET15]

Der  $\lambda$ -Wert von 0,04 liegt im Bereich von Mineralwolle. (siehe Abb. 4.11 mitte)<sup>19</sup> *Gap solution* setzt Wabenplatten als so genannte Solarwabe in Fassadentafeln ein. Dabei wird die offene Waben hinter einer Flachglasscheibe montiert. Eine Lüftungsebene sorgt für die Ableitung überschüssiger Wärme und feuchter Luft. Das *Gap-Panel* erzeugt im Winter einen Temperatenausgleich durch Wärmespeicherung und im Sommer für Kühlung, da sie weniger Energie aufnimmt als eine Ziegelwand. Die Firma führt eine große Anzahl umgesetzter Architekturbeispiele an und erläutert das Prinzip sehr anschaulich in technischen Datenblättern. (siehe Abb. 4.11 rechts)<sup>20</sup>



**Abbildung 4.11:** Bauklimatisch wirksame Papierwerkstoffe: Unger-Diffutherm, Betz Zellstoffverbundelement, GAP:skin (v.l.n.r.)

Die Verschmelzung der beiden Kategorien wird von verschiedenen Forschungsprojekten vorangetrieben. Hier ist vor allem das Produkt *Ecocell* der Firma Ecocell AG in Uttwil (Schweiz) zu nennen. Es beruht auf der in dieser Arbeit behandelten SWAP-Wabenplatte, welche mehrlagig im Wechsel mit Holzplatten verleimt werden. Die Wabe wird durch eine Zementbeschichtung extrem stabil und gegen Brand ertüchtigt.<sup>21</sup>

#### Zusammenfassung

Wird aus dem Papierwerkstoff die gesamte Konstruktion und Außenhülle des Bauwerks hergestellt, sind besondere Vorkehrungen zu treffen. Einerseits ist die Fassade wasserdicht auszubilden, was nur durch Applikation einer wasserführenden Schicht zu realisieren ist, da Papierwerkstoffe naturgemäß keine Nässe-resistenz besitzen. Andererseits sind Spannweiten, wie sie beispielsweise mit Holzbauteilen erzielt werden, nicht ohne weiteres mit Bauteilen aus Papierwerkstoffen zu erreichen. Soll das Bauwerk gänzlich aus Wellpappe oder Wabenplatten bestehen, sind deshalb Einschränkungen hinsichtlich der Wasserdichtigkeit und der Größe des umbauten Raums hinzunehmen. Lastabtragende und bauklimatische Funktionen sind nur mit Bauteilen aus Papierwerkstoffen zu erreichen, wenn diese für die jeweilige Aufgabe detailliert geplant und in den notwendigen Bereichen ertüchtigt werden. Die Kombination beider Schwerpunkte in einem Architekturprojekt stellt den Planer vor große, jedoch nicht unlösbare Aufgaben. Dabei ist der Sicherung der Nässe-resistenz der Papierbauteile eine besondere Beachtung zu schenken.

<sup>19</sup>Webseite: [www.zellstoffverbundelement.com](http://www.zellstoffverbundelement.com), Abruf am 18.05.2015. [Bet15]

<sup>20</sup>Webseite: [www.gap-solutions.at](http://www.gap-solutions.at), Abruf am 18.05.2015. [GAP15]

<sup>21</sup>Webseite: [www.ecocell.ch](http://www.ecocell.ch), Abruf am 18.05.2015. [Ise15]



## 4.2 Testreihen zur Entwicklung umsetzbarer Baudetails

Die Anwendung von gefalteten Bauteilen aus Papierwerkstoffen in einem Experimentalbau erfordert die genaue Kenntnis von deren Leistungsfähigkeit sowie die Reaktion auf einwirkende Kräfte aus Wind und Schnee. Dabei sind statische Kennwerte ebenso zu ermitteln wie die Möglichkeiten der Ertüchtigung gegen eindringende Feuchte. Die für die Errichtung des Experimentalbaus notwendigen Versuchsreihen und die damit verbundenen Empfehlungen zur Machbarkeit werden in diesem Kapitel beleuchtet.

### 4.2.1 Tragfähigkeit von Bauteilen aus gefalteten Wabenplatten

Die in Kapitel 3.5 vorgestellte und parametrisierte Abwicklung eines Rahmenquerschnitts auf Basis eines gleichseitigen Dreiecks ist auf seine Belastbarkeit zu überprüfen. Dabei wird offensichtlich, dass die Geometrie als Stütze wie auch als Träger in einem Rahmen mit den Abmessungen 310cm x 310cm funktionieren muss. Die vertikale Druckfestigkeit der Stützen wird aufgrund der Erkenntnisse der Versuche in Kapitel 3.2.3 als sehr hoch eingestuft. Weniger exakt ist die Biegesteifigkeit der Träger und die Stabilität der Rahmenecken einzuschätzen. Deshalb sind Belastungstest durchzuführen, um die Leistungsfähigkeit der Konstruktion zu evaluieren. Vier Testreihen werden nachfolgend erläutert. Die beiden ersten widmen sich der Biegesteifigkeit des oberen Trägers zur Ermittlung seiner Tragfähigkeit unter Schneelast. Zwei weitere Versuche beleuchten das Verhalten des Rahmens unter reduzierter und voller Windlast.

#### Versuch 1 – Biegesteifigkeit des oberen Trägers

Um die Biegesteifigkeit eines ersten Prototyps zu ermitteln, wird dieser als hälftiger Rahmen hergestellt und mit steigenden Gewichten belastet. Die ermittelten Werte lassen erste Rückschlüsse auf die Leistungsfähigkeit der Konstruktion zu und zeigen auch eventuelle Schwächen auf. Da bei diesem Versuch die maximale Belastbarkeit des Rahmens zu ermitteln ist, werden die Belastungsstufen nach und nach erhöht, ohne auf die Langzeitverformung einzugehen.

#### Material und Methoden

Die bügelförmige Geometrie wird aus zwei L-förmigen Rahmenecken generiert, deren Kopplung in der Mitte des Tragelements erfolgt. Sämtliche Bauteilfügungen werden durch eingesteckte Schienen aus Wabenmaterial mit handelsüblichen Weißleim realisiert. Die Abmessungen des Bauteils sind  $L = 310\text{cm}$ ,  $B = 32,8\text{cm}$ ,  $H = 155\text{cm}$ . Zur Lastverteilung wird auf dem Rahmen eine Wabenplatte mit der Stärke von 6cm gelegt. Mit Stahlkugeln gefüllte Säcke mit einem Einzelgewicht von 25kg dienen der Beschwerung und erlauben die schrittweise Erhöhung der Last. Nach jeder Auflage eines Sacks wird die Größe der Durchbiegung gemessen und dokumentiert.

##### Durchführung

Der Ausgangsabstand von Trägerunterkante zum Boden wird gemessen. Die sukzessive Beschwerung des Trägers mit jeweils einem Sack bedingt eine Biegeverformung des Trägers und somit eine Verkürzung des Abstands zum Boden. Die Auflage der ersten Beschwerung erfolgt in der Mitte. Alle weiteren Säcke werden in Richtung der Außenkanten des Rahmens platziert. Nach jeder Belastung wird der Abstand zum Boden neu vermessen, bis die Konstruktion versagt. Abbildung 4.12 links zeigt das Bauteil mit einer Belastung von 225kg.



**Abbildung 4.12:** Belastungstest an einem hälftigen Rahmen mit Beschwerung (links) und nach dem Versagen (rechts)

##### Ergebnisse

Exakt 19 Sekunden nach Auflage des neunten Gewichts versagt die Konstruktion und zeigt eine schlagartige Schwächung der papiernen Zugelemente im Träger. Der Grund hierfür ist eindeutig in der mittigen Fügung der beiden Eckprofile zu finden, wo lediglich ein einzelnes Element durchläuft. Die größte Last wirkt hier am augenscheinlich schwächsten Punkt. Eine nachträgliche Inspektion bringt auch die Erkenntnis, dass einige Leimstellen trotz zweitägiger Trocknungsphase nicht vollständig ausgehärtet und somit nicht voll tragfähig sind.

Es wird festgehalten, dass die statischen Leistungsdaten des Trägers mit den vorgestellten Methoden einfach zu ermitteln sind. Eine Interpolation der vertikalen Tragfähigkeit eines Rahmens auf die Gesamtfläche des Experimentalbaus ergibt eine knappe Unterschreitung der abzutragenden Schneelast. Dieser Umstand und das plötzliche Versagen zeigt die Notwendigkeit der Verbesserung des Konstruktionssystems. Besonderes Augenmerk ist dabei auf die Fügung der Bauteile zu legen. Weitere zwischen den Trägern laufende Verbindungen sind deshalb zu konzipieren, um die Kraftübertragung zu ertüchtigen. Eine großflächigere Verklebung der Verbindungselemente wird angeraten.

## Versuch 2 – Biegesteifigkeit eines verbesserten Trägers

Es wird eine Versuchsanordnung entwickelt, welche den gesamten Rahmen an einer vertikalen Stahlstruktur aufnimmt. Durch Drehung des Rahmens um  $90^\circ$  wird die horizontale Windbelastung durch vertikale Auflage von Gewichten simuliert. Der Versuchsaufbau ist Abbildung 4.14 auf Seite 164 zu entnehmen. Die Befestigung des Rahmens an dem Stahlgerüst erfolgt mittels Spanngurten. (siehe Abb. 4.13 links) An der gegenüberliegenden unteren Ecke hält ein Bock die Konstruktion in Waage. Zur Absicherung gegen seitliches Ausbrechen wird der Rahmen im Unterbereich durch eine Hilfskonstruktion geführt. (siehe Abb. 4.13 rechts) Die vertikale Belastung der Konstruktion erfolgt in drei Durchgängen durch Auflage von Gewichten in Form von Stahlkugelsäcken (25kg) bzw. mit Sand gefüllten Säcken (20kg). Somit ist die Biegeverformung infolge Schneelast ebenso zu testen, wie die Rahmenverformung infolge reduzierter und voller Windlast.



**Abbildung 4.13:** Aufbau der Versuchsanordnung (links), Befestigung mit Spanngurten (mitte) und Führung gegen Ausbrechen (rechts)

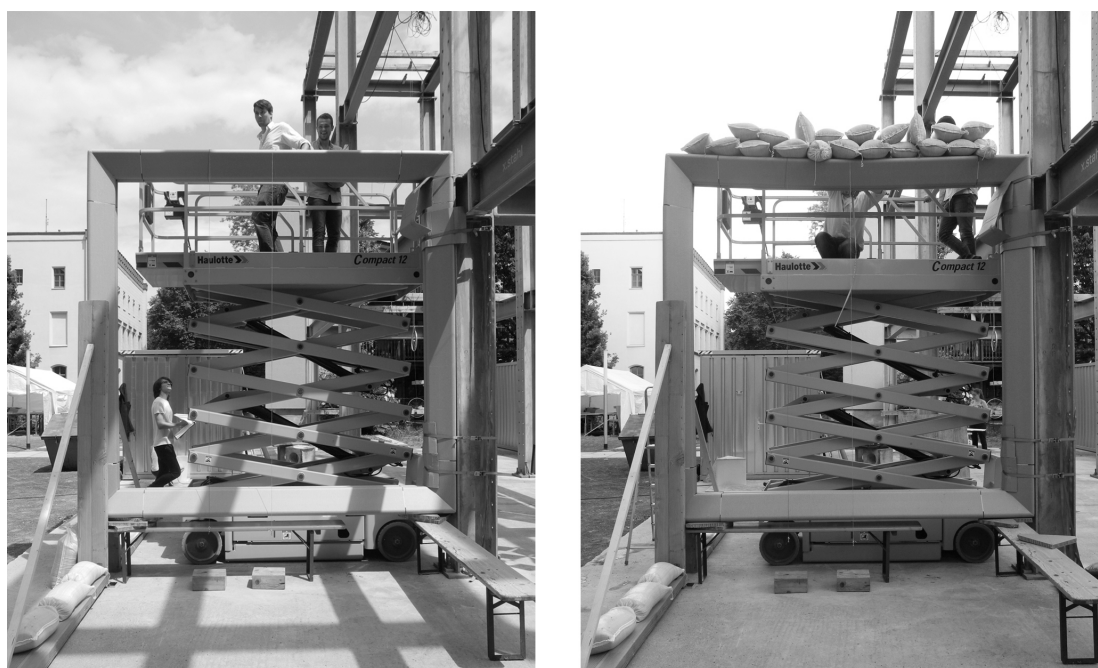
Unter dem Eindruck der oben präsentierten ersten Versuchsreihe wird die Konfiguration des Rahmensystems geändert. Die Bauteilfügung findet nun nahe der Ecken statt, sodass ein durchlaufendes horizontales Tragelement der Lastableitung dient. Dies hat zur Folge, dass nicht mehr nur vier sondern acht Fügestunkte pro Rahmen zu realisieren sind. Die offensichtliche Ertüchtigung des Mittelbereiches der Träger rechtfertigt diesen Schritt. Neben dieser Geometrieangepassung erfolgt auch eine Verstärkung der rechteckigen Rahmenbauteile durch Einschub von Ecken aus Multiplex. Diese ertüchtigen die Knotenpunkte erheblich und dienen als idealer Übergangspunkt an den Verbindungsstellen. Eine detaillierte Beschreibung der Knoten erfolgt in Kapitel 4.3.4.

### Material und Methoden

Ein kompletter Rahmen wird laut obiger Beschreibung an dem Stahlgerüst montiert. Zur direkten Kraftweiterleitung erfolgt eine Unterstützung der Bauteilecken mit Böcken.

### Durchführung

Die Belastung des Trägers wird durch Auflage von 20 Sandsäcken realisiert, was einem aufgelegten Gesamtgewicht von 400kg entspricht. Die Säcke werden nacheinander über die gesamte Länge des Trägers platziert. Nach 3 und 10 Minuten erfolgt eine Messung der Verformung im nach außen zeigenden Drittelpunkt und im Mittelpunkt. Nach 10 Minuten werden die Sandsäcke abgenommen und eine letzte Messung dokumentiert den verformten Endzustand. Tabelle 4.9 zeigt die Ausgangswerte, die Zwischenergebnisse nach 3 und 10 Minuten sowie den Zustand nach Entlastung. Abbildung 4.14 zeigt den Rahmen vor und nach der Belastung.



**Abbildung 4.14:** Biegeverformung eines Rahmens vor dem Versuch (links) und mit Belastung (rechts)

### Ergebnisse

Die geringe Verformung des Trägers zeigt die Leistungsfähigkeit der Konstruktion. Der Standort des Gebäudes befindet sich in Schneelastzone II auf 208m über NHN. Dadurch ergibt sich eine Schneelast von  $75\text{kg}/\text{m}^2$ . Wird die Größe der Dachfläche ( $17,7\text{m}^2$ ) ins Verhältnis zur Anzahl der Rahmen (6 Stück) gesetzt, hat jeder Rahmen eine Belastung von 225kg Schneelast abzuleiten. Die durchgeführten Testreihen zeigen, dass die Konstruktion genügend Reserve für weitaus höhere Schneelasten vorhält.<sup>22</sup>

<sup>22</sup>Deutsches Institut für Bautechnik: Schneelastzonen in Deutschland, Excel-Tabelle, Fassung vom 29.11.2013, Webseite: <https://www.dibt.de>, abgerufen am: 20.6.2015. [DIB13]

### Versuch 3 – reduzierte Windlast auf einen Rahmen

Zur Ermittlung der Stabilität der Rahmen unter Einwirkung äußerer Einflüsse wie Windlasten und innerer Beanspruchungen wie Eigengewicht sind komplexe Berechnungen durchzuführen. Die Lastannahmen für den Experimentalbau sind vereinfacht nach DIN EN 1991-1-1 zu ermitteln.<sup>23</sup> Dabei sind die auf einen einzelnen Rahmen wirkenden Lasten aus Winddruck und -sog durch Bestimmung der Schnittkraftverläufe mit klassischen Ingenieurmethoden zu ermitteln. Die notwendige Form wird als Rahmen mit äußerlich statisch bestimmter Lagerung angenommen und nach Rahmenform 96 des Standardwerks *Rahmenformeln* von Kleinlogel und Haselbach bestimmt.<sup>24</sup> Da der Experimentalbau als temporäres Gebäude mit einer Standzeit von weniger als einem Jahr konzipiert wird, können die Annahmen zur Windlast aufgrund des vorübergehenden Zustands auf 60% gesenkt werden. (siehe nationaler Anhang der DIN EN 1991-NA.B.5) Der Winddruck wird ermittelt, indem die Zone des Standorts mit der Geometrie und einem Sicherheitsbeiwert multipliziert werden. Somit ergibt sich die Multiplikation des Geschwindigkeitsdrucks  $q_s$  mit dem aerodynamischen Beiwert  $c_{pe}$  und dem Faktor 1,5 als Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_E$ . Aus diesen Bedingungen ergibt sich die Formel:

$$w_e = q_s \cdot c_{pe} \cdot \gamma_E \quad (4.1)$$

Die berechneten Werte für Winddruck  $w_1$  und Windsog  $w_2$  lauten:<sup>25</sup>

$$w_1 = +0,78kN/m \quad (4.2)$$

$$w_2 = -0,48kN/m \quad (4.3)$$

### Material und Methoden

Der Testrahmen wird wie im oben beschriebenen Versuch am Stahlgerüst befestigt. Beide Eckpunkte werden zunächst mit Böcken unterstützt. Zur realitätsnahen Simulation der Streckenlast infolge Wind sind die Lasten vollständig aufzulegen, bevor die Böcke entfernt werden. Die Werte aus 4.2 und 4.3 werden auf die Länge des Trägers interpoliert und aufgrund der temporären Standzeit des Gebäudes auf 60% reduziert. Es ergibt eine Belastung des oberen Trägers von 125kg und des unteren Trägers von 50kg. Die Auflage erfolgt gleichmäßig über die gesamte Länge. Abbildung 4.15 zeigt den Ausgangszustand mit Unterstützung (links) und die resultierende Verformung nach Belastung (rechts).

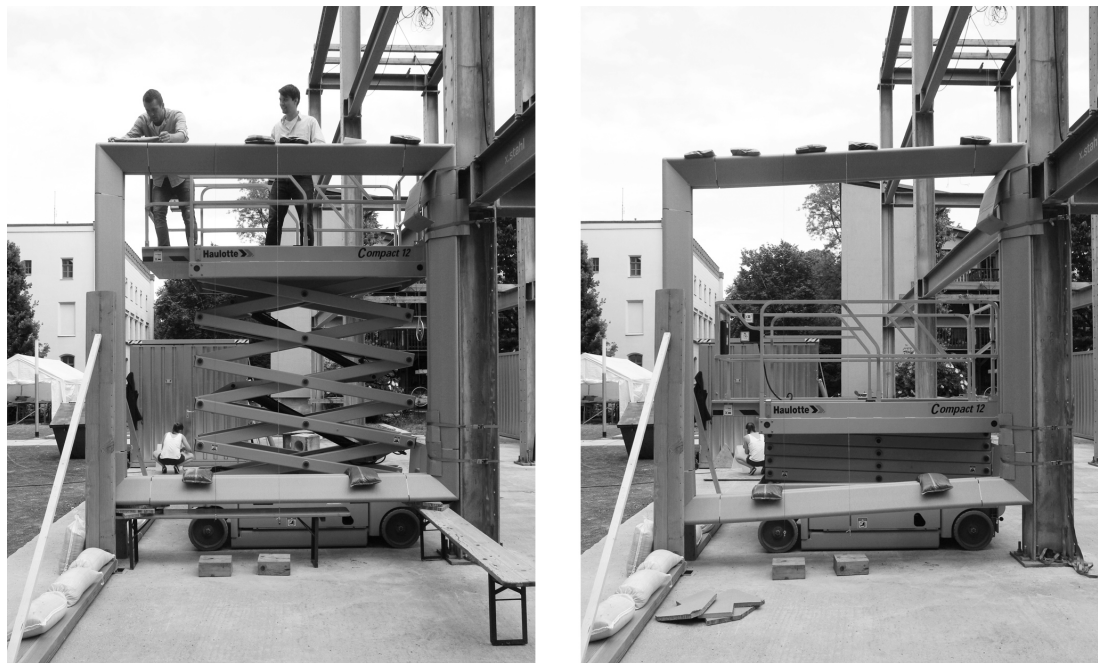
<sup>23</sup>DIN 1991-1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau, Dezember 2010. [DIN12a]

<sup>24</sup>Kleinlogel, A.; Haselbach, W.: *Rahmenformeln*, Ernst und Sohn Verlag, 1993, S.424. [KH93]

<sup>25</sup>Thessmann, G.: *Tragverhalten von Papierwerkstoffen*, Seminararbeit, Bauhaus-Universität Weimar, 2015, S.19. [The15]

##### Durchführung

Die Konstruktion wird 18 Minuten belastet und die Verformung wird kontinuierlich am äußeren Eckpunkt, im nach außen zeigenden Drittelpunkt und im Mittelpunkt des Rahmens abgelesen. Die abgelesenen Werte sind Tabelle 4.10 auf Seite 207 Seite zu entnehmen.



**Abbildung 4.15:** Belastungstest an einem ganzen Rahmen vor dem Versuch (links) und nach der Belastung (rechts)

##### Ergebnisse

Der Rahmen verformt sich unter reduzierter Windlast innerhalb von 18 Minuten um 27,8cm an der äußeren Ecke. Nach Entlastung federt die Konstruktion auf einen Wert von 17,3cm zurück. Die Konstruktion ist demnach in der Lage, den reduzierten Windlasten standzuhalten und reagiert trotz einer geringen elastischen Rückbewegung plastisch auf Windlasten.

Anzumerken ist, dass der Fassadenaufbau durch seine Tiefe und die ganzheitliche Verklebung der Bauteile weiter zur Ertüchtigung des Rahmens beiträgt und somit dessen Leistungsfähigkeit erhöht. Es ist ebenfalls denkbar, den in die Berechnung eingeflossenen Teilsicherheitsbeiwert zu reduzieren, da sich der Standort des Gebäudes in einem sehr windgeschützten Bereich befindet, wo viele große Gebäuden in der Umgebung die Windbelastung weiter reduzieren. Somit wird die Empfehlung zur Umsetzung des Projektes mit zeitlich beschränkter Standzeit gegeben.

### Versuch 4 – volle Windlast auf einen Rahmen

Obwohl die Konstruktion die Bedingungen der reduzierten Windlasten erfüllt, ist zu ermitteln, ob der Rahmen den tatsächlichen Windlasten ebenso standhält. Diese Information wird interessant, wenn der Rahmen eine Weiterentwicklung erfährt, um beispielsweise größere Spannweiten zu generieren.

#### Material und Methoden

Befestigung des Rahmens am Stahlgerüst analog zu Versuch 3.

#### Durchführung

Der obere Träger wird mit 11 Säcken beschwert und der untere Träger erhält eine Belastung von 6 Säcken. Das resultierende Gesamtgewicht beträgt 340kg. Nachdem die Ballastierung abgeschlossen ist, wird der Bock entfernt. Abbildung 4.16 zeigt den Rahmen mit vollständiger Belastung und nach dem Versagen.



**Abbildung 4.16:** Belastung eines ganzen Rahmens vor dem Versuch (links) und nach dem Versagen (rechts)

#### Ergebnisse

Nach Entfernung des Stützbocks versagt die Konstruktion schlagartig. Die Rahmenecken sind nicht in der Lage, die vollen Windlasten abzuleiten. Aufgrund der zulässigen Reduzierung der angesetzten Windlasten kann der Experimentalbau trotzdem errichtet werden. Das Ergebnis zeigt ein Optimierungspotential bezüglich der Queraussteifung der Rahmenform. Die Leistungsfähigkeit der gefalteten Bauteile aus Wabenplatten wird eindrucksvoll bewiesen. Empfohlen wird die Untersuchung der Leistungsfähigkeit der gesamten Wandkonstruktion (Addition mehrerer Rahmen im Verbund mit verklebten Fassadenplatten), denn hier werden eine Ertüchtigung der Queraussteifung vermutet.

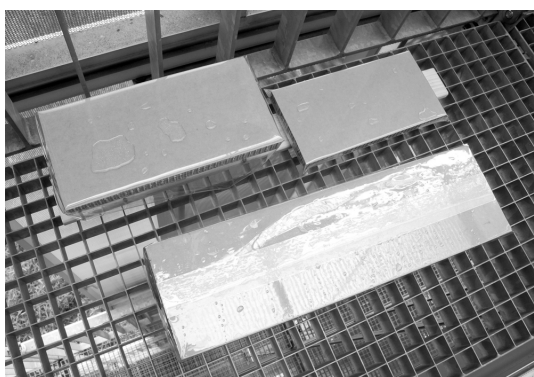
#### 4.2.2 Wasserbeständigkeit von Fassadenelementen aus Wabenplatten

Die grundlegende Entscheidung, auch die Fassade des Experimentalbaus aus Wabenplatten zu realisieren, erfordert die Ertüchtigung des Materials gegen Nässe. Dies führt zu unterschiedlichen Ansätzen zur Erhöhung der Resistenz gegen Feuchte und Wasser. Folgende drei Maßnahmen zum Schutz der Papieroberflächen gegen eindringende Feuchtigkeit werden untersucht und anschließend erläutert:

1. offene und geschlossene Verkleidung der Wabenplatten mit klarer PVC-Folie und Fügung mittels Klebeband
2. großflächige Anwendung PE-kaschierter Wabenplatten und Versiegelung der Fugen mittels Materialaufdopplung und Silikon
3. ganzheitliche Aufbringung einer Zweikomponenten-Dichtschlämme mit spaltüberbrückenden Eigenschaften

##### Versuchsreihe 1 – Verkleidung mit PVC-Folie

Zu untersuchen ist die Verbindung einer tragenden, aber wasserempfindlichen Wabenplatte mit einer durchsichtigen Folie zur Sicherstellung der Fassadendichtigkeit.



**Abbildung 4.17:** Abdichtung von Proben mit PVC-Folie (links), Vergleich von zwei Proben mit Ausbleichung zu einer unbeeinflussten Wabenplatte (rechts)

##### Material und Methoden

Die kalandrierte Weichfolie aus PVC hat eine Stärke von  $300\mu\text{m}$ .<sup>26</sup> Die in Abbildung 4.17 links dargestellten Varianten der PVC-Abdeckung sind in der Lage, die Wabenplatten über lange Zeiträume effizient zu schützen. Die Testierung umfasst die oberseitige Abdeckung einer einzelnen Wabenplatte mit unterseitiger Öffnung und die gesamte Einhausung einer einzelnen Wabenplatte mit Abdichtung der Folienübergänge mittels Klebeband.<sup>27</sup> Zusätzlich wird die gesamte Einhausung eines Verbunds aus sieben Wabenplatten mit luftdichter Abdichtung der Folienübergänge geprüft.

<sup>26</sup>Hersteller: Pütz GmbH, Produkt: WF-TRP S glatt, Härte: 68, Dichte:  $1,26\text{g/cm}^3$

<sup>27</sup>Hersteller: Scotch Klebefilm, Magic 810 M8101910, Transparent, Breite: 19 mm



### Durchführung

Die Lagerung der Proben erfolgt auf einem luftumspülten und beregneten Rost. Der Testzeitraum umfasst 5 Monate von Januar bis Mai 2014. Dadurch werden die Einflüsse des kalten und feuchten Winters sowie der warmen und trockenen Frühlingsmonate auf die Wabenplatte sichergestellt. Regelmäßige Kontrollen sorgen für den ordnungsgemäßen Versuchsaufbau.

### Ergebnisse

Die Papieroberfläche zeigt eine Bleichung durch die andauernde UV-Bestrahlung sowie kleine Bereiche von Durchfeuchtung an den Folienübergängen. Der Vergleich einer im Unterbereich offenen und einer gesamtheitlich eingehausten Probe zu einer im Innenbereich und ohne Umwelteinwirkungen gelagerten Probe ist in Abbildung 4.17 rechts dargestellt. Während die Papieroberfläche der lediglich abgedeckten Probe eine mittelstarke Bleichung aufweist, zeigt die unter Luftabschluss verpackte Probe eine starke Bleichung. Somit scheint der Kontakt mit der Umgebungsluft nicht nur einen Einfluss auf die Durchfeuchtung und Trocknung der Elemente zu haben sondern wirkt sich auch auf den Grad der Entfärbung der Papieroberfläche aus.

Da die zur Verfügung stehende PVC-Folie nur eine Breite von 1350mm aufweist, sind Folienübergänge mit Klebebändern herzustellen. Hier werden Undichtigkeiten vermutet, die sich im Laufe der Zeit einstellen könnten. Eine Materialfügung durch Verschmelzung der Folienkanten erscheint im Verhältnis zur Konstruktionsaufgabe nicht sinnvoll. Auch ist nicht abschließend zu klären, wie die Folie um Kanten und Ecken des Gebäudes zu führen wären. Zusätzlich wird hinterfragt, wie eine gänzlich von PVC-Folie umhüllte Wabenplatte an einer Unterkonstruktion zu befestigen wäre, ohne die Folienoberfläche zu beschädigen. Aus diesen Gründen wird die Anwendung von PVC-Folie als Abdichtung verworfen.

## Versuchsreihe 2 – Einsatz PE-kaschierter Wabenplatten

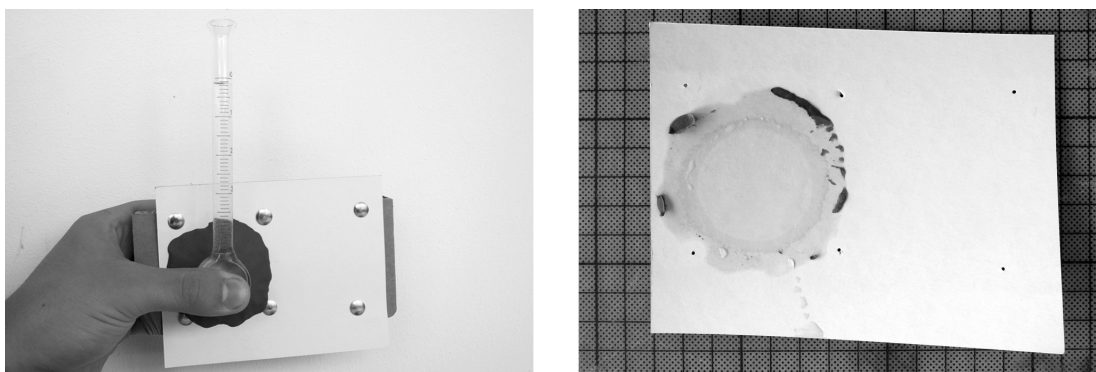
Die Firma SWAP bietet zwei Deckliner mit weißer PE-Kaschierung an, welche in Kapitel 3.1.2 auf Seite 62 erläutert werden. Diese Kaschierung lässt eine Wasserdichtigkeit der Wabenplatten vermuten, weshalb diese Eigenschaften näher zu untersuchen sind. Hierbei liegt der Fokus neben auf dem Übergang zwischen zwei Wabenplatten.

### Material und Methoden

Für die nachfolgenden Testreihen wird das Testlinerpapier mit einer Grammatur von  $305\text{g/m}^2$  eingesetzt. Die Stärke der aufgetragenen PE-Folie beträgt  $15\text{g/m}^2$ . Untersucht wird die Reaktion des Materials auf stehendes Wasser sowie die Dichtigkeit der Fugenübergänge.

### Durchführung

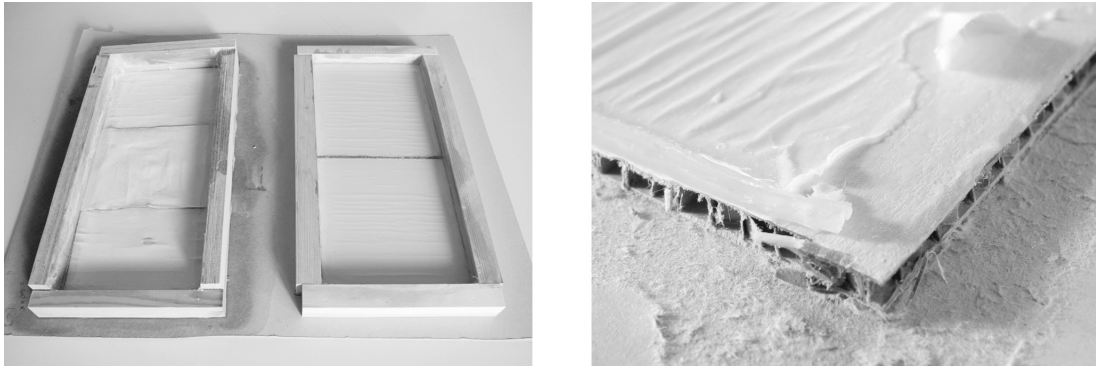
Zunächst wird die reine Wasserdichtigkeit der Oberfläche des Deckliners ohne Einfluss der Fugenüberbrückung geprüft. Abbildung 4.18 links zeigt den Versuch mit dem Karstenschem Prüfröhrchen bei einer Wassersäule von 10cm. Die rechte Abbildung zeigt das Ergebnis nach 15 Minuten. Gut zu erkennen ist der Bereich des in die Kaschierung eingedrungenen Wassers. Eine komplette Durchnässung ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht erkennbar, doch stellt sich diese nach längerem stehenden Wasser ein. Erkennbar wird dies auf der Rückseite des Papiers.



**Abbildung 4.18:** Versuche zur Überprüfung der Wasserdichtigkeit an PE-kaschiertem Deckliner mittels Karstenschem Prüfröhrchen (links), Ergebnis nach 15 Minuten (rechts)

Zur Überprüfung von Methoden zur Schließung von Stoßfugen zwischen den Wabenplatten kommen Testaufbauten zum Einsatz, die stehendes Wasser simulieren können. Eine Wabenplatte (Stärke: 5mm) mit PE-kaschiertem Testliner wird von vier Quadratstäben aus Holz bündig eingerahmt. Die Übergänge von Wabenplatte und Holz werden mit einer Silikonfuge abgedichtet. Zur Indikation von Undichtigkeiten erfolgt die Verklebung des Rahmens auf einer Graupappe, welche den Wasseraustritt durch Verfärbung anzeigt.

Abbildung 4.19 links zeigt den Versuchsaufbau von zwei parallel angeordneten Rahmen. So sind vergleichende Testreihen mit unterschiedlichen Varianten der Abdichtung möglich und erlauben die Evaluierung der Zeiträume bis zum Versagen.



**Abbildung 4.19:** Spaltüberbrückung mittels Materialaufdopplung und Silikonfuge (links) und Ablösung der Kaschierung (rechts)

Die Überbrückung der Fugen durch Überklebung von Streifen desselben Papiermaterials mit Silikon wird im linken Wasserbecken gezeigt. Sie führt nicht zu den gewünschten Ergebnissen. Die direkte Spaltüberbrückung im rechten Becken mittels Silikonfuge scheint zunächst wirksam zu funktionieren. Nach Einwirkung von stehendem Wasser über 3 Stunden wird jedoch auch hier Wasserdichtigkeit eingebüßt. Während die linke Probe die Leckage direkt durch Dunkelfärbung des darunter befindlichen Graukartons anzeigt, bleibt die rechte Probe zunächst trocken und versagt erst zeitversetzt. Hier ist vor allem die wellenartige Aufwölbung der Oberfläche gut zu erkennen. In der detaillierten Abbildung 4.19 rechts ist die Beschädigung der Paperoberfläche und die Ablösung des Kaschiermaterials gut zu erkennen.

### Ergebnisse

Diverse Versuche zur Überprüfung der dauerhaften Wasserdichtigkeit führen zu ernüchternden Ergebnissen, da sich die Kaschierung unter Wassereintritt ablöst und den empfindlichen Kernbereich freilegt. Dieser Vorgang benötigt zwar einige Zeit unter stehendem Wasser, doch ist eine dauerhafte Wasserdichtigkeit nicht festzustellen. Die Testreihen zeigen, dass das PE-kaschierten Decklinerpapier über eine zeitlich begrenzte Wasserresistenz verfügt. Als problematisch wird die Überbrückung der Fugen angesehen, da selbst bei gewissenhafter Versiegelung kleinste ungeschützte Bereiche durch Wassereintritt beeinträchtigt werden. Die Saugwirkung des Papiers sorgt für eine schnelle Vergrößerung des Lecks durch Ablösung der Kaschierung. Die Ergebnisse legen den Schluss nahe, die PE-kaschierten Deckliner nicht im Außenbereich zum Regen- und Spritzwasserschutz einzusetzen. Im Innenbereich können diese Papiere ohne Probleme zur Anwendung kommen und erlauben auch kurzzeitige Wasserkontakte z.B. bei der Oberflächenreinigung mit einem feuchten Tuch.

### Versuchsreihe 3 – Dichtschlämme als wasserführende als Schicht

Die vorangegangenen Versuche zeigen, dass die Wabenplatten ganzheitlich zu behandeln sind, um sie wirksam gegen Niederschlag, Schnee und mechanische Einflüsse zu ertüchtigen. Hierbei ist ein Material einzusetzen, was nicht nur eine wasserdichte Papieroberfläche generiert, sondern auch spaltüberbrückend arbeitet und nicht zuletzt ästhetischen Ansprüchen genügt.

#### Material und Methoden

Das Produkt *Superflex D2* des Herstellers *Saint Gobain Weber GmbH* wird als “Gemisch aus hydraulisch abbindenden Bindemitteln, mineralischen Zuschlägen und organischen Zusätzen sowie Polymerdispersionen in pulverförmiger oder flüssiger Form” beschrieben. Vor allem die Beständigkeiten gegen Frost, UV-Einstrahlung, Temperaturschwankungen, Wasser und Laugen sowie die Fähigkeit zur Rissüberbrückung werden hervorgehoben.<sup>28</sup> Das Material wird zur äußeren und inneren Abdichtung von unterirdischen Gebäudeteilen angewendet und dient auch als horizontale Sperre, als Haftgrund und als Klebstoff.

#### Durchführung

Zunächst ist die pulverartige mineralische Komponente und das flüssige Bindemittel im Verhältnis 1:1 anzumischen. Die Konsistenz entspricht einem Brei, welcher mit handelsüblichen Putzerwerkzeugen zu verarbeiten ist. Der Auftrag erfolgt zweifach durch Abzug mittels glattem Kratzspachtel, was zu einer relativ glatten Oberflächenstruktur führt. Wird die noch feuchte Masse mit einer Farbrolle behandelt, entsteht eine homogene aber raue Oberfläche.



**Abbildung 4.20:** Auftrag der Zweikomponenten-Dichtschlämme mit Spachtel (links), Abzug der zweiten Lage (mitte), Test der Wasserdichtigkeit an einer mit der Dichtschlämme behandelten Papierprobe (rechts)

<sup>28</sup>Bauaufsichtliches Prüfzeugnis P-220007395, Materialprüfungsamt Nordrhein-Westfalen, 2010.

Die resultierende Materialstärke dieser Abdichtung beträgt ca. 1mm. Zunächst werden Vorabversuche mit Spachtel durchgeführt, um die Konsistenz und Verarbeitung des Dichtmaterials kennenzulernen. Nach Trocknung einer ersten Schicht, wird eine zweite Lage aufgetragen, um die Haftungseigenschaften zu evaluieren. Erste Tests mit kleinen Mengen Wasser, welche auf den Deckliner mit dieser Beschichtung aufgebracht werden, zeigen die Dichtigkeit des Materials. Abbildung 4.20 zeigt die Vorgehensweise. Die an den Materialstößen der Wabenplatten auftretenden Fugen können durch die exakte Vorbehandlung und Montage der Fassadentafeln auf max. 2mm begrenzt werden. Zur Spaltüberbrückung bieten sich diverse Herangehensweisen an. Zunächst können die Fugen mit unterschiedlichen Mitteln aufgefüllt werden. Näher betrachtet werden Weißleim, Silikon, Spachtelmasse für Holzfugen sowie die Dichtschlämme selbst. Darüber hinaus sind auch Brücken mit Klebebändern, Materialaufopplungen und weiteren Dichtmaterialien denkbar. Nach zahlreichen Voruntersuchungen und einer Evaluierung der Ergebnisse hinsichtlich der Elastizität und der Haltbarkeit werden für die Testreihen folgende drei Methoden zur Spaltüberbrückung ausgewählt:

1. Verfugung mit Silikon
2. Auffüllung mit der Zweikomponenten-Dichtschlämme
3. Einarbeitung eines gummierten Gewebebandes<sup>29</sup>

Für die Versuchsreihen werden Wabentafeln mit Fugen von 2mm nebeneinander auf Untergestelle aus Holzrahmen geklebt, was zu minimalen Bewegungen im Fugenbereich führt und somit die Elastizität der Spaltüberbrückungen aufzeigt. Der Auftrag der Masse erfolgt zweischichtig, was die Ausbesserung eventuell ausgelassener Stellen ermöglicht. Abbildung 4.21 zeigt die drei gewählten Konzepte der Spaltüberbrückung.

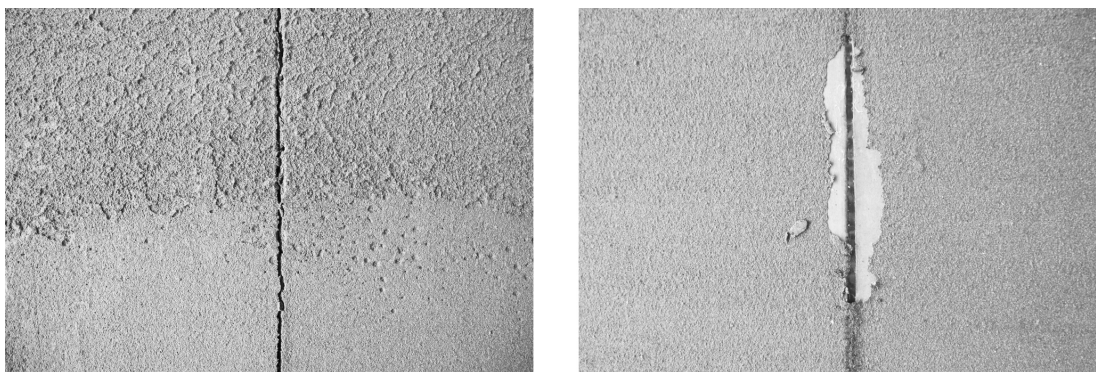


**Abbildung 4.21:** Testreihen zur Spaltüberbrückung: Versiegelung mit Silikon (links), Auffüllung mit Dichtschlämme (mitte), Überbrückung mit gummierten Gewebestoff (rechts)

<sup>29</sup>Das Gewebefließ *weber.sys 982* der Firma Saint Gobain Weber GmbH wird in Streifen von 5cm als Überbrückung der Spalten angewendet.

##### Ergebnisse

Die Anmischung und Verarbeitung der Dichtschlämme gestaltet sich problemlos.<sup>30</sup> Die Haftung auf der Papieroberfläche ist als sehr gut einzustufen. Die Wasserdichtigkeit ist ausgezeichnet. Versuche mit stehendem Wasser über mehrere Tage zeigen keinerlei Beeinträchtigung der Wirkungsweise. Auch die Lagerung im Außenbereich sowie die dadurch herbeigeführte Temperaturschwankungen wirken sich nicht negativ aus. Im Hinblick auf die Plattenübergänge wird postuliert, dass die Füllung der Fuge mit dem Dichtmaterial problemlos zu bewerkstelligen ist und in den Bereich farblich passend schließt. Als kritisch ist der zu erwartende Schwund nach Trocknung zu bewerten. Selbst ohne Bewegung der Probestücke zeigen sich in fast allen Fällen Risse im Fugenbereich, was in Abbildung 4.22 ersichtlich ist. Dort ist auch der Unterschied zwischen dem Auftrag mit Rolle (oben) und dem Abzug mit glattem Kratzspachtel (unten) zu erkennen. Bei der Realisierung von Bauteilen im Außenbereich und den zu erwartenden Materialbewegungen ist deshalb von der Auffüllung der Fugen mit der Dichtschlämme abzuraten.



**Abbildung 4.22:** Ergebnis der Spaltüberbrückung mit Dichtschlämme (links) und Silikon (rechts)

Die Fugenbehandlung mit Silikon ist einfach realisierbar, doch haftet die Dichtschlämme nicht darauf. Selbst ohne große Kraftanstrengung kann die Schicht vom Silikon abgezogen werden, weshalb diese Lösung ebenfalls ausscheidet. Abbildung 4.22 zeigt die Problematik. Zu hinterfragen wäre in diesem Zusammenhang, ob neben dem verwendeten Silikon weitere elastische Füllmaterialien am Markt existieren, die der Dichtschlämme maximalen Halt bieten. Das gummierte Dichtband erzeugt eine elastische und mängelfreie Fugenüberbrückung. Zur Herstellung ist ein weiterer Arbeitsschritt notwendig, denn das Band muss zunächst mit der Dichtschlämme über die Fuge geklebt werden, bevor der zweischichtige Materialauftrag beginnt. In Anbetracht der guten Ergebnisse ist dies als notwendige Maßnahme zu betrachten. Einzig die Materialaufdickung im Bereich des Dichtbandes wird als unästhetisch eingestuft. Deshalb wird sie durch geschicktes Anputzen ausgeglichen.

<sup>30</sup>Die Trocknungszeit ist abhängig von der Umgebungstemperatur. Bei 22°C ist die Oberfläche nach 1h soweit abgetrocknet, dass sie berührt werden kann. Die komplette Durchtrocknung dauert 24h.

## 4.3 Konzeption des Projektes *OpenSource: Cardboard*

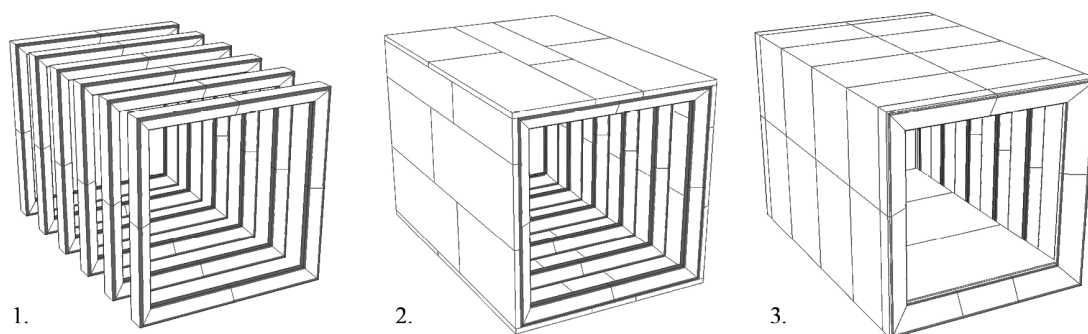
Die Analyse der Architekturbeispiele hat gezeigt, dass Bauteile aus Papierwerkstoffen durchaus zur Realisierung von Architekturprojekten herangezogen werden können. Dabei sind die stabileren Wabenplatten den einfachen Wellpappen vorzuziehen, da sie über wesentlich höher Festigkeitswerte verfügen. Der hier beschriebene Experimentalbau versucht vereint die jeweiligen Vorteile flacher und gefalteter Elemente und manifestiert diese in einem dauerhaften Gebäude. Mit einer Länge von 5,05 Metern, einer Breite von 3,36 Metern und einer Höhe von 3,58 Metern bietet der eingeschossige Bau Raum für mindestens sechs geräumige Arbeitsplätze. Die Tragstruktur wird von sechs quadratischen Rahmen gebildet, die aus gefalteten Wabenplatten bestehen. Eine Beplankung mit Wabenplatten dient der thermischen Isolierung und eine Haltekonstruktion aus Holzlatten trägt die äußere Fassadenschicht, die ebenfalls aus Wabenplatten besteht. Die dadurch erzeugte Trennschicht sorgt für eine ausreichende Hinterlüftung der Fassade im Wand- und Dachbereich. Als äußerer Wasserabschluss dient eine Zement-Kunststoff-Dichtschlämme, welche die Oberfläche aus Papier dauerelastisch schützt und für eine homogene, architektonisch ansprechende Erscheinung sorgt. Die Stirnseiten verfügen südlich über eine doppellagige, mechanisch vorgespannte ETFE-Folienfassade und nördlich über zwei leichtgängige, mittig drehbare Portaltüren.

### 4.3.1 Entwurfsparameter

Die oben erläuterte Definition besagt, dass die Ableitung sämtlicher statischer Kräfte des Pavillons über gefaltete Tragelemente zu erfolgen hat. Deren Aufbau soll so einfach wie möglich gestaltet sein, da die im Herstellungsprozess aufgewendete Zeit und die eingesetzten Ressourcen zu minimieren waren. Eine Kombination aus gefalteten und ebenen Bauteilen aus Wabenplatten sollen die positiven Eigenschaften der jeweiligen Elemente im Pavillon manifestieren. Auch die Fassade wird aus Papierwerkstoffen aufgebaut sein, um dem Anspruch von Gruppe zwei zu entsprechen. Aus diesem Grund wird für die Konzeption des Experimentalbaus *OpenSource: Cardboard* ein *doppelt beplanktes Rahmensystem* entwickelt, dass neben der statischen Kraftleitung auch eine vollständig funktionsfähige hinterlüftete Fassade darstellt. Dafür wird definiert, dass mit wenigen Ausnahmen sämtliche Bauteile der Konstruktion aus Wabenplatten herzustellen sind. Zu diesen Ausnahmen gehören Kunststoffe (äußere Fassadenschicht, Folienfenster, Türflächen), Holzwerkstoffe (Fußbodenfläche, Rahmen für Fenster, Türen und Fundament), Metallwerkstoffe (Anschluss von Folienfassade und Türen) und Sand (inneres Auflastfundament). Die nachfolgende Beschreibung des Experimentalbaus wird in Teilbereiche gegliedert, um eine detaillierte Erläuterung des jeweiligen Forschungsaspektes und der Art der Umsetzung zu gewährleisten. Dabei wird auf die statisch wirksamen Träger und Stützen, welche durch spezielle Knotenpunkte als Rahmen funktionieren, die hinterlüftete Fassadenkonstruktion aus Wabenplatten sowie auf die papierfreien Bereiche des Gebäudes eingegangen. Die notwendigen Testreihen werden dabei ebenso beleuchtet wie die zur Anwendung gekommen Ergebnisse. Abschließend erfolgt die Bewertung der eingesetzten Lösungen nach einer Standzeit von 10 Monaten.

### 4.3.2 Aufbau und Struktur

Das statische System des Pavillons beruht auf sechs quadratischen Rahmen mit einer Beplankung aus Wabenplatten. Die Basis bilden Bohlen aus Lärchenholz (8 x 20cm), welche als Streifenfundament auf einer Schicht aus Gehwegplatten aufliegen. Sie tragen eine doppelte Lage OSB (38mm) als nivellierte Grundfläche des Pavillons. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 4.23 dargestellt und besteht aus den drei konstruktiven Etappen *Rahmensystem*, *Wärmedämmebene* und *Fassade*.



**Abbildung 4.23:** Schematische Perspektive des konstruktiven Aufbaus

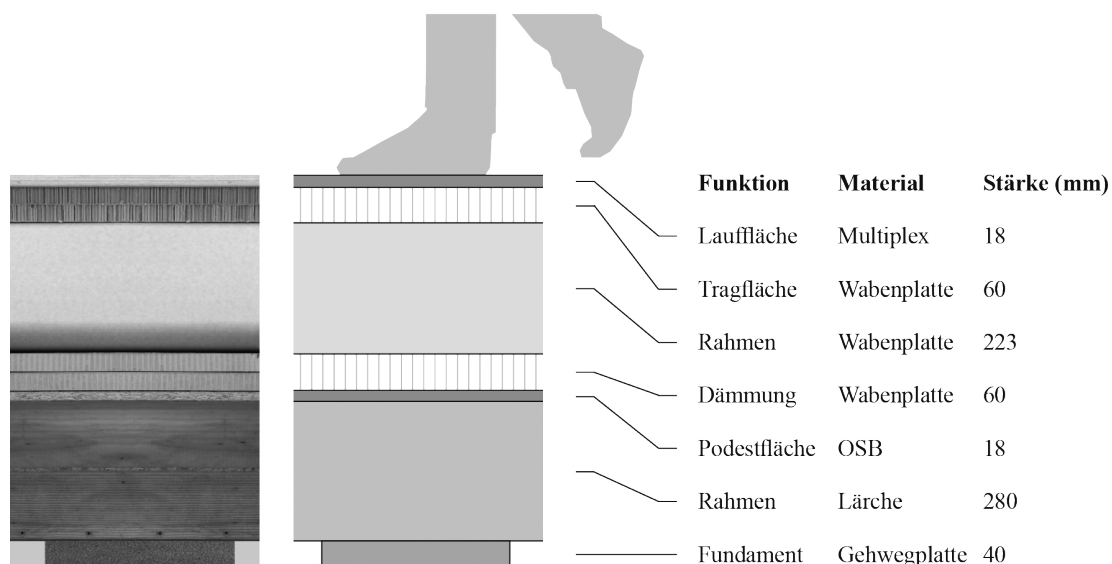
1. Auf der OSB-Fläche bilden versetzt verklebte Wabenplatten mit einer Stärke von 6cm die untere thermische Isolierungsschicht. Mit einem längsseitigen Achsabstand von 90cm werden die vertikal stehenden Rahmen eingemessen und mithilfe eines temporären Haltesystems mit der Bodenfläche verklebt.
2. Es folgt die Befestigung einer horizontalen Lage von 6cm starken Wabenplatten als thermische Isolierung an den Seitenflächen. Nach dem gleichen Muster wird die Dachfläche in Längsrichtung beplankt. Die Konstruktion stellt eine an beiden Stirnseiten vollständig geöffnete und ausgesteifte Röhre mit quadratischem Querschnitt dar.
3. Auf der horizontalen Beplankung werden vertikal verlaufende Dachlatten (4 x 6 cm) aufgeklebt und bilden eine Hinterlüftungsebene mit vertikaler Strömungsrichtung. Ihr Achsabstand entspricht der hälftigen Plattenbreite einer Wabenplatte. Somit wird jedes Fassadenelement an den Längsseiten und in der Mittelachse sicher befestigt. An den Gebäudekanten werden gefaltete Platten angebracht, deren Winkel von 90° durch eine quer verlaufende Decklinierentfernung definiert sind. Somit treten Fugen ausschließlich auf den Außenflächen des Gebäudes auf und werden an den Kanten vermieden. Auf der Oberseite der unteren horizontalen Rahmen erfolgt die Montage von 6cm starken Waben als Tragstruktur der Fußbodens. Diese wird mit einer Laufschiene aus Multiplex-Platten versehen, was zu einer stabilen und unempfindlichen Lauffläche führt.



### 4.3.3 Fundamentierung und Aufbau des Bodens

Der Standort auf dem Campus der Bauhaus-Universität Weimar ist ebenerdig zugänglich und erlaubt die Vorfertigung der Rahmenbauteile in den universitätseigenen Werkstätten. Die Konzeption des Experimentalbaus sieht ein Auflastfundament vor, um kostenintensive Gründungsarbeiten zu vermeiden. Grundlage bilden Gehwegplatten, welche die Lasten eines Tragrosts aus Lärchenholz in den Boden ableiten. Dieser Rost besteht aus aufgedoppelten Lärchenbohlen, auf denen eine Lage OSB zur exakten Nivellierung der Konstruktion ruht. Dies ermöglicht die Ausbildung einer umlaufenden Fuge, welche den Körper eine schwebende Erscheinung verleiht und diesen aus dem Spritzwasserbereich heraushebt.

Eine 6cm starke Schicht aus Wabenplatten dient der thermischen Isolierung und somit dem wärmedämmenden Abschluss nach unten. Darauf sind die Rahmen aus gefalteten Wabenplatten montiert. In deren Zwischenraum befinden sich mit Sand gefüllte Säcke. Sie bilden ein Auflastfundament mit einem Gewicht von 1,2t. Eine darüber angebrachte Schicht aus Wabenplatten spannt zwischen den Rahmen und nimmt die abschließende Lauffläche aus Holz auf. Abbildung 4.24 zeigt den Vertikalschnitt durch diesen Bereich und die verwendeten Materialien mit den Dimensionen der Schichten.



**Abbildung 4.24:** Schnitt durch den Bereich des Auflastfundaments: Ansicht der Materialien (links), schematischer Schnitt (mitte), Beschreibung mit Materialstärken (rechts)

Die beschriebene Konstruktion bietet eine Reihe von Vorteilen. Neben der Vermeidung einer Fundamentgrube ist hier vor allem die umlaufende Dämmebene zu nennen, denn diese wird denkbar einfach um die Konstruktion herum geführt. Sie folgt der Geometrie der Rahmen und ist dabei so druckfest, dass das gesamte Bauwerk auf ihr ruht. Dadurch sind simple Anschlussdetails zu realisieren.

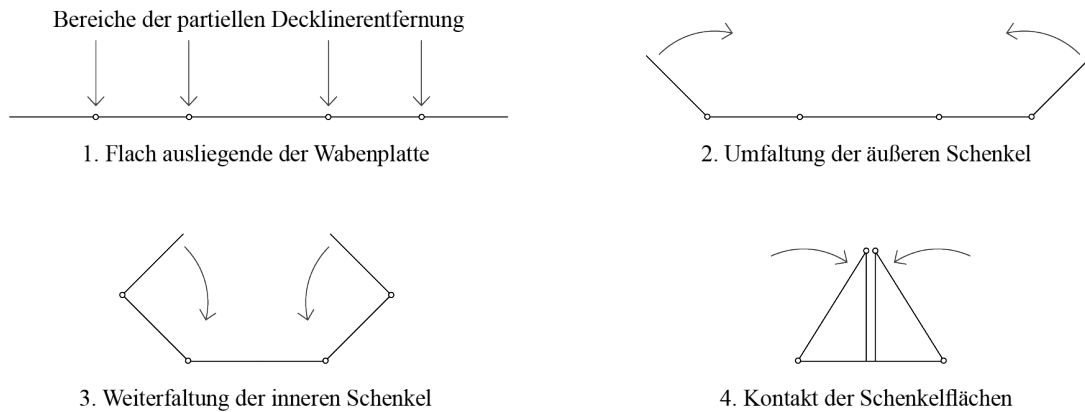
### 4.3.4 Rahmensystem

Die Erforschung gefalteter Wabenplatten führt zu diversen Geometrien, welche in Kapitel 3.4 erläutert und bewertet werden. Die dort beschriebene Problematik der Aussteifung gegen horizontale Kräfte bei Querschnitten auf Basis von regelmäßigen Vielecken erlaubt die grundlegende Definition, dass Stützen und Träger eine Dreiecksform besitzen müssen, da derartige Bauteile bereits ausgesteift sind und eine überschaubare Anzahl von Faltachsen besitzen. Vertikale Tragelemente mit der Form eines gleichseitigen Dreiecks können horizontale Kräfte aus allen Richtungen effizient ableiten. Die Geometrie der horizontalen Träger wird aus den vorgenannten Gründen ebenfalls als gleichseitiger Dreiecksquerschnitt mit einem Breite-Höhen-Verhältnis von 2:3 geplant. Erste Versuche mit verklebten Prototypen zeigen eine hohe Stabilität der Elemente, welche bei einer Spannweite von 3 Metern die Last mehrerer Personen tragen. Deshalb wird festgelegt, dass die Stützen und Träger einen umlaufenden Rahmen bilden, um so eine abgeschlossene, statisch wirksame Einheit zu generieren. Dabei wird registriert, dass den Knotenpunkten zwischen Stütze und Träger eine besondere Aufmerksamkeit zu schenken ist, denn hier treffen gleichseitige Dreiecksformen auf gleichschenklige Querschnitte.

Die zu erwartenden Probleme der Winkeldefinitionen bei gleichzeitigem Anspruch einer ästhetischen Erscheinung der Rahmen mündet in einer einheitlichen Geometrie für die vertikalen und horizontalen Tragelemente. Die Abmessungen der Querschnitte richten sich nach den höchsten zu erwartenden Kräften in vertikaler Richtung auf die Träger. Die in Kapitel 3.4.2 beschriebenen Querschnitte auf Basis eines gleichseitigen Dreiecks werden gegenübergestellt und auf ihre Anwendbarkeit in dem Experimentalbau überprüft. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Querschnitt einerseits eine außen umlaufende Fassade, eine innen montierte Fußbodenfläche und weitere, an den Wandflächen befestigte Elemente zu tragen hatte. Die in Abbildung 3.25 unten rechts dargestellte Variante (6) vereint alle notwendigen Eigenschaften. Die Ecke, welche das eingeschobene Flächenelement einschließt, zeigt in den Innenraum des Bauwerks. Dieses Element wird als universeller Anschlusspunkt gesehen, denn es dient der Befestigung innen liegender Wandbauteile, des Fußbodens und der Versteifung der Rahmenecken. An der gegenüberliegenden Fläche des Bauteils sind demnach die Fassadentafeln flächig zu verkleben.

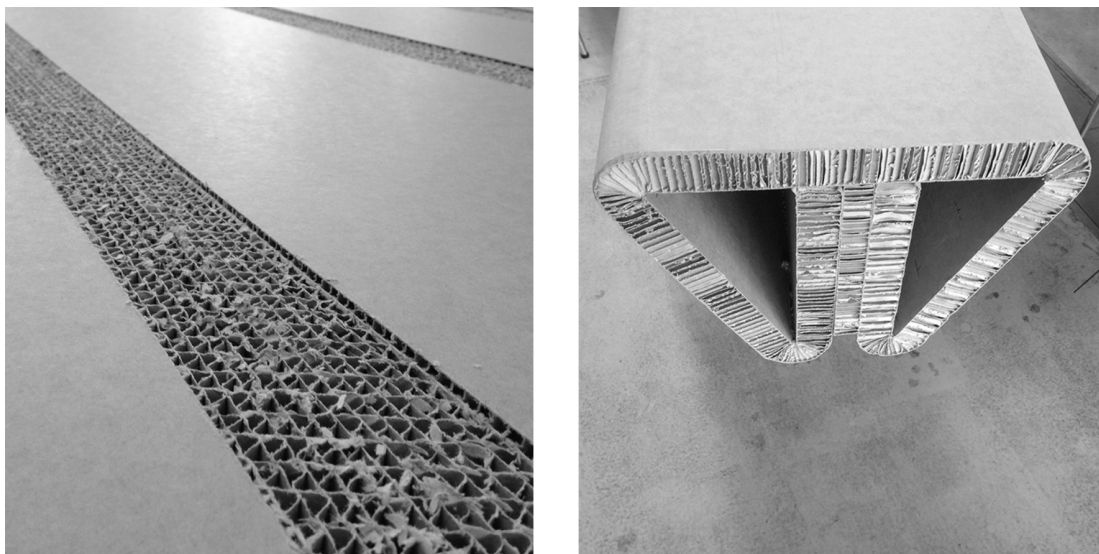
#### Rahmenprofile

Die Definition des Querschnitts auf Basis eines gleichseitigen Dreiecks bestimmt die exakten Positionen der Decklinerentfernung. In Abbildung 4.25 wird der zugrunde liegende Faltprozess an einem schematischen Querschnitt der Wabenplatte verdeutlicht. Die Bereiche der partiellen Decklinerentfernung markieren die Gelenke der Faltachsen. Bei exakter Verklebung der beiden eingeklappten Schenkelflächen ergibt sich die gleichseitige Dreieckstruktur automatisch und generiert ein verwindungssteifes Profil.



**Abbildung 4.25:** Schema des Faltprozesses

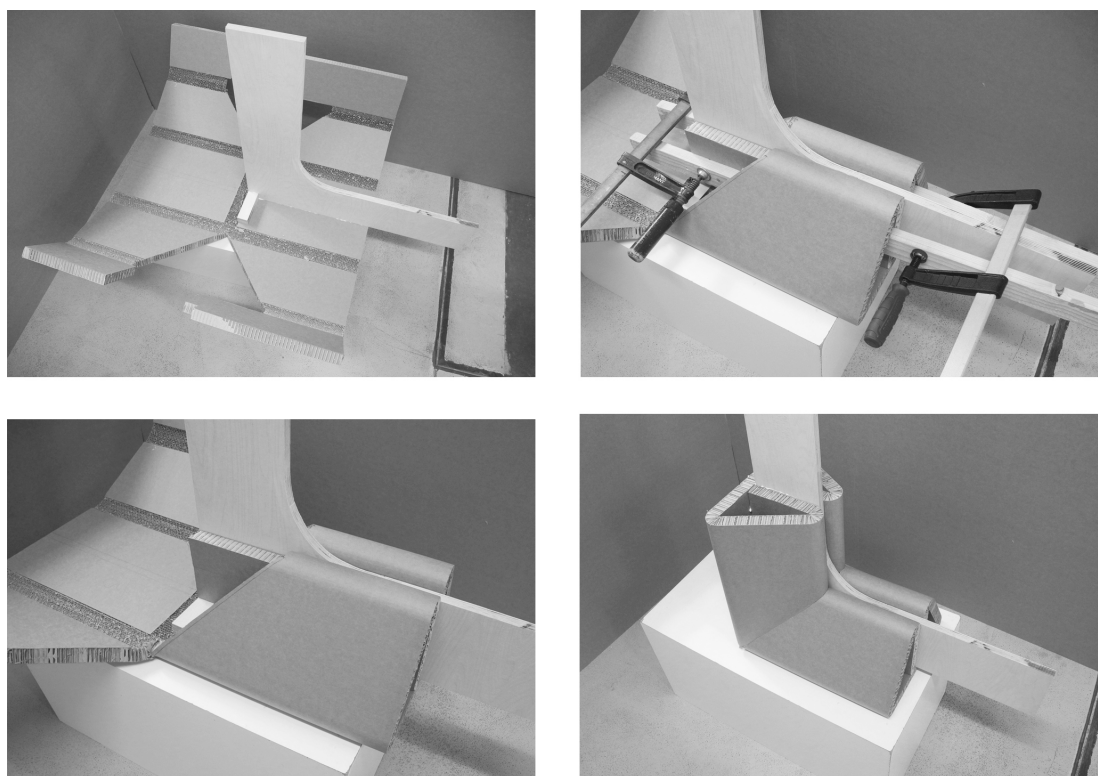
Hierfür ist die Wabenplatte mit exakt positionierten Decklinerentfernungen zu versehen, welche von CNC-gesteuerten Fräsmaschinen erzeugt werden. Die Frästiefe beträgt 1mm und gibt die Positionen der Faltungen vor. Abbildung 4.26 zeigt den Ausschnitt einer so bearbeiteten Wabenplatte und den Prototyp eines Rahmenbauteils. Gut zu erkennen ist die Struktur auf Basis eines gleichseitigen Dreiecks. Im Mittelbereich, wo sich die beiden eingeklappten Schenkelflächen treffen, ist ein Platzhalteprofil aus Wabenmaterial eingeklebt. Es ragt nicht aus dem Profil heraus und definiert so eine ästhetische Fuge zwischen den beiden Rundungen der Profilmaltung.



**Abbildung 4.26:** Wabenplatte mit Fräsungen (links) und daraus produzierter Bauteil (rechts)

##### Knotenpunkte

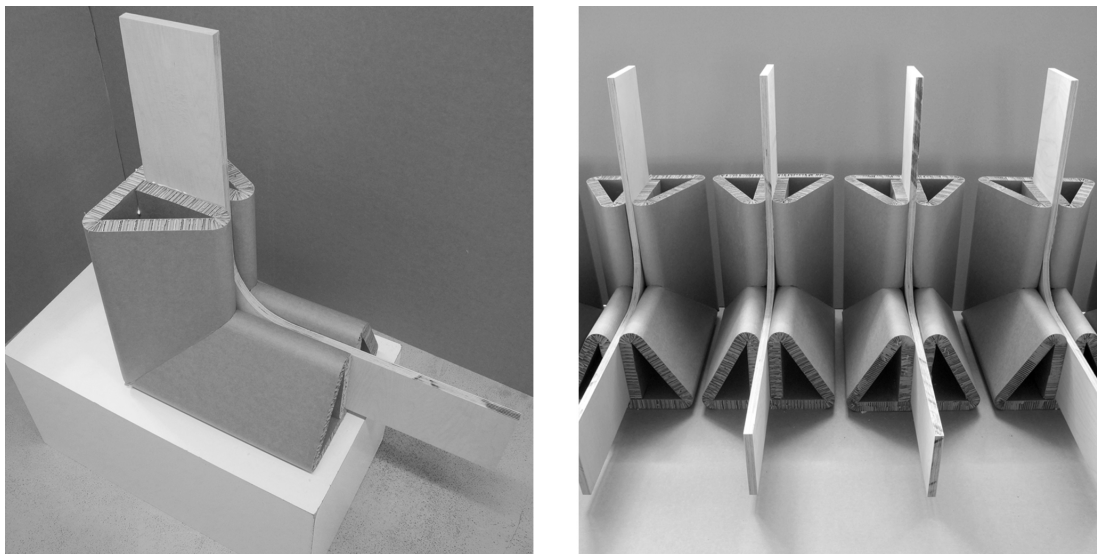
Nach geometrischer Entwicklung und modellhafter Überprüfung der Knotengeometrie erfolgt der Bau dieser Eckelemente. Durch die besondere Formgebung des Pavillons als quadratisches Rahmensystem mit kompletter Öffnung der Stirnseiten, wird eine Aussteifung in Querrichtung benötigt. Da aufgrund des experimentellen Charakters der Konstruktion keine Erfahrungswerte für die Steifigkeit des Systems vorliegen, ist ein positiv beschiedener Bauantrag mit den geplanten Ecken nicht zu erwarten ist. Deshalb sind die Rahmenecken zu ertüchtigen. Hierfür werden in den Zwischenraum der Schenkel stabilisierende Eckprofile aus Multiplex eingeklebt. Sie führen zur Ausbildung einer nachweisbaren biegesteifen Ecke und bilden zugleich ein Nut-Feder-System aus, was den exakten Anschluss der Träger und Stützen ermöglicht. Für die Montage ist eine Wabenplatte vorzubereiten, welche über die vier länglichen Fräsungen aus der Abwicklung des Bauteils in Abbildung 3.43 auf Seite 142 verfügt. Anschließend werden die beiden Polygonzüge unter Berücksichtigung des schrägen Anschnitts ausgeschnitten. Deren Abmessungen und die Berechnung des Schnittwinkels finden in Kapitel 3.5.6 eine ausführliche Erläuterung.



**Abbildung 4.27:** Montage eines Knotenpunktes durch Verleimung von Wabenplatte und Versteifung

Vor Beginn der Montage ist die Wabenplatte auf die gewünschte Länge einzukürzen, welche durch die Länge der Schenkel des Knotens bedingt ist. Die Versteifung aus Multiplex wird ausgesägt und im Eckbereich mit einer Abrundung von  $\varnothing 10\text{cm}$  versehen, um Spannungsspitzen infolge Biegung in dieser Zone zu vermeiden.<sup>31</sup> Der Zusammenbau eines Knotenpunktes erfolgt in folgenden drei Schritten:

1. Den ersten Montageschritt stellt die zentrierte Verleimung des Versteifungsholzes auf der Mittelachse der Wabenplatte dar. Ein kleines quadratisches Hilfsholz im Eckbereich stellt die exakte Winkligkeit der Verklebung sicher und verbindet die inneren Deckliner kraftschlüssig. (siehe Abb.4.27 oben links)
2. Nach Austrocknung werden die beiden ersten Schenkel eingeklappt und ganzflächig mit dem Multiplex sowie stirnseitig mit der Wabenplatte selbst verklebt. Dies wird mithilfe von Schraubzwingen bewerkstelligt, welche die Flächen fest andrücken. (siehe Abb.4.27 oben rechts) Das fertige Bauteil ist nun für den letzten Arbeitsschritt vorbereitet. (siehe Abb.4.27 unten links)
3. Die Umfaltung der beiden letzten Schenkel erfolgt nach behutsamer Anschrägung der diagonalen Stirnseiten. Die Verklebung ist analog zu Schritt 2 durchzuführen. (siehe Abb.4.27 unten rechts)



**Abbildung 4.28:** Detailansicht eines Knotenpunktes und vorgefertigte Elemente

Abbildung 4.28 links zeigt die exakte Fügung der Schenkelflächen und das Zusammenspiel von gefalteter Wabenplatte mit der abgerundeten Multiplex-Versteifung. Deutlich ragen die Multiplex-Teile heraus, welche die kraftschlüssige Verbindung zum benachbarten Bauteil sicherstellen. Die Vorfabrikation aller Knotenpunkte des Experimentalbaus ermöglicht die Herstellung identischer Bauteile, wie sie in Abbildung 4.28 rechts gezeigt sind. Dadurch wird die passgenaue Montage vor Ort möglich.

<sup>31</sup>Biegeversuche mit scharfen rechtwinkligen Ecken im Multiplex führen zum frühzeitigen Versagen.

### 4.3.5 Fassadenaufbau

Um einen möglichst hohen Anteil an Papierwerkstoffen im Experimentalbau *OpenSource: Cardboard* zur Anwendung bringen zu können, wird eine hinterlüftete Fassade konzipiert. Dadurch können Wabenplatten auch als Fassadentafeln eingesetzt werden, da sie bei Feuchteintrag leicht abtrocknen. Die in Kapitel 4.3.2 erläuterten Rahmen tragen horizontal ausgerichtete Wabenplatten mit einer Stärke von 6cm. Sie sind mittels Weißleim aufgebracht. Im Innenbereich wird zwischen den Rahmen eine weitere Waben-schicht mit der Stärke von 3cm befestigt, was zu einer thermisch wirksamen Isolierdicke von 9cm führt. Auf die horizontalen Wabenplatten erfolgt die Montage einer vertikalen Holzlattung mit dem halben Rasterabstand der Konstruktionsrahmen. Diese Hinterlüftungsebene hat eine Tiefe von 4cm und verläuft über beide vertikalen Außenflächen sowie die Dachfläche. (siehe Abb. 4.29 links) Die Lufteinlässe sind an der geschützten Unterseiten der Fassade integriert. Sie werden von den umgebogenen Fassadenplatten gebildet. (siehe Abb. 4.29 mitte) Die Luftauslässe bestehen aus Kunststoff-Rundprofilen, welche an den Oberseiten der Fassade eingesteckt sind und durch ihren Überstand vor eindringendem Niederschlag in den Fassadenzwischenraum schützen. (siehe Abb. 4.29 rechts) Diverse innere Revisionsöffnungen erlauben die Kontrolle dieses Zwischenraums durch Sichtbegutachtung.

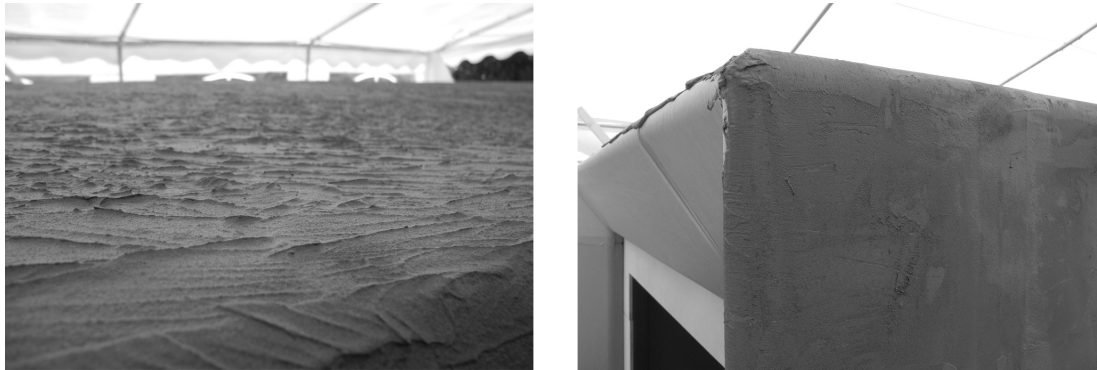


**Abbildung 4.29:** Aufbau der hinterlüfteten Fassade: Schichtung, Lufteinlass, Luftauslass (v.l.n.r.)

Die kontinuierliche Luftumspülung der Wabenplatten sorgt für die schnelle Trocknung jener Bereiche, welche mit Tauwasser oder Umgebungsfeuchte in Berührung kommen. Die Konstruktion zeigt eine effiziente Wirkweise, welche durch den fühlbaren Luftstrom an den Luftauslässen bestätigt wird. Er wird durch Temperaturunterschiede im Zwischenraum erzeugt und funktioniert in warmen Sommermonaten ebenso wie im kühlen Winter. Die wirksame Zwangslüftung bestätigt die vorherige Annahme, dass eine zusätzliche Imprägnierung oder Beschichtung der Innenbereiche der Hinterlüftungsebene nicht zwingend benötigt wird.

##### Fassadenoberfläche

Die in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Testreihen zeigen die Anwendbarkeit der Dichtschlämme als wasserführende Schicht im Fassaden- und Dachbereich. Nach Überbrückung sämtlicher Fugen mit dem oben beschriebenen gummierten Gewebeband erfolgt ein erster Auftrag des Materials mit einem glatten Kratzspachtel. Die zweite Schicht wird wesentlich großzügiger aufgetragen und mit einer handelsüblichen Maler-Rolle behandelt. Dadurch wird das Material gleichmäßig aufgebracht und stellt den absolut wasserdichten Abschluss der Dachfassade sicher, dessen Materialstärke bei ca. 3mm liegt. Abbildung 4.30 zeigt den Übergang von Dach zu Wand und die wellenartige Oberfläche.



**Abbildung 4.30:** Auftrag der Dichtschlämme im Flachdachbereich links und im im vertikalen Fassadenbereich (rechts)

Die vertikale Fassade wird ebenfalls mit zwei Schichten behandelt. Beide werden mit dem glatten Kratzspachtel abgezogen, was zu einer rauen, aber homogenen Oberfläche führt. Die Stärke beider Schichten beträgt 1,5 – 2mm, da im vertikalen Fassadenbereich kein stehendes Wasser zu befürchten ist. In Abbildung 4.30 rechts ist auch der noch unbehandelte Bereich der Stirnkante des Gebäudes zur sehen. Die von den gefalteten Wabenplatten vorgegebenen Rundungen werden mit Pinseln bearbeitet, da der Spachtel hier nicht zweckmäßig einzusetzen ist. Die allumfassende Beschichtung des Gebäudes führt zu einer einheitlichen Erscheinung und unterstreicht den architektonischen Anspruch.

##### 4.3.6 Stirnseiten des Pavillons

Die südliche Fassade wird durch eine mechanisch vorgespannte Folienfassade geschlossen. Die großformatige, doppelagige ETFE-Membran sorgt für einen lichtdurchfluteten Innenraum und verknüpft die innere Struktur mit dem Außenraum. Sie ist in Abbildung 4.38 auf Seite 197 dargestellt. Die nördliche Eingangsseite wird über zwei mittig gelagerte Drehtüren geschlossen, welche mit einem Kern aus unkaschiertem Wabenmaterial gefüllt sind. Das sorgt für eine Regulierung des einfallenden Lichts auf dieser Seite. Durch die Flügelkonstruktion ist der Pavillon über die gesamte Gebäudebreite zu öffnen. Abbildung 4.39 auf Seite 198 zeigt ihre Funktion.

## 4.4 Monitoring

Obwohl die Standzeit des Experimentalbaus begrenzt ist, können in Dauertestreihen wertvolle Informationen gesammelt werden. Dadurch wird eine Evaluierung über verschiedene Jahreszeiten hinweg möglich. Geprüft werden die strukturelle Integrität des Gebäudes inkl. der Veränderung seiner Dimensionen infolge Temperaturschwankungen, die dauerhafte Dichtigkeit der Fassadenbeschichtung, die Wirksamkeit der Wärmedämmung, die Trägheit des Gebäudes sowie die eingetragene Feuchtigkeit.

### 4.4.1 Jahreszeitliche Dimensionsänderung

Um die Ausdehnung und Schrumpfung der Wabenplatten über einen längeren Zeitraum zu bestimmen, werden Markierungen am Gebäude positioniert, deren Abstand in regelmäßigen Intervallen zu messen ist.

#### Material und Methoden

Als Messgerät kommt der Lasermesser *Bosch GLM 250 VF Professional* zum Einsatz, dessen Messgenauigkeit von  $\pm 1\text{mm}$  beträgt. Der Messzeitraum umfasst 10 Monate und 12 Messungen. Die erfassten Änderungen von Länge, Breite und Höhe des Gebäudes mit dem jeweiligen Messdatum werden nach folgendem Schema evaluiert:

- Beide Längsseiten werden im Innenbereich in der Höhe von 1,30m vermessen, wobei die Werte der Strecken A-A und B-B zu vergleichen sind.
- Die Breitenänderung wird am vierten Rahmen aus Sicht der Eingangsöffnung in einer Höhe von 1,30m ermittelt. Hier wird der Wert der Strecke C-C ermittelt.
- Die Änderung der Höhe wird an den vier inneren Rahmen gemessen, welche weder die Folienfassade, noch die Türen aufnehmen. Die Überprüfung erfolgt in der exakten Trägermitte lotrecht nach unten. Die Werte D-D, E-E, F-F und G-G geben dabei Aufschluss über die vertikale Verformung.

#### Durchführung

Die Messung erfolgt durch Anlegen der Rückseite an Markierung 1 und Anvisierung von Punkt 2 mit dem Laser. Die Position der Messpunkte ist Abbildung 4.46 auf Seite 202 zu entnehmen. Die Werte sind in Millimetern abzulesen.

#### Ergebnisse

Die Änderungen von Länge und Breite können als marginal bezeichnet werden. Im Laufe des Messzeitraums von Juli 2014 – Mai 2015 wird eine Längenänderung von +1mm für A-A und B-B ermittelt. Dies entspricht einer Änderung um annähernd 0,02%. Auch die Breitenausdehnung (C-C) fällt mit +2mm sehr gering aus und kommt einer Änderung von 0,08% gleich. Beide Längenänderungen werden kurz nach Beginn der Messungen ermittelt, was auf eine anfängliche Setzung der Struktur und einer daraus resultierenden Längen- und Breitenänderung zurückzuführen ist.

Die Höhen des Gebäudes reduzieren sich allmählich infolge Kriechen durch Eigenlast.



Während der Pavillon in Länge und Breite minimal zunahm, verringerte sich seine Höhe vom Mittelpunkt der horizontalen Träger zum Fußboden. Dabei ist die Verformung bei den beiden mittleren Trägern (E-E und F-F) mit  $-8\text{mm}$  am größten. Die beiden folgenden Träger (D-D und G-G) verzeichnen mit jeweils  $-6\text{mm}$  eine etwas geringere Verformung. Die ermittelten Werte lassen Rückschlüsse auf ein weiteres Setzen der Struktur zu, und legen den Schluss nahe, dass sich dieses Verhalten weiter fortsetzen wird. Die Werte aller Messungen sind Tabelle 4.11 auf Seite 208 zu entnehmen. Es wird festgehalten, dass diese eine Höhenreduzierung und auch eine Höhenausdehnung zeigen. Interessanterweise reduzieren sich die Trägerhöhen gleichmäßig und ohne Abhängigkeit von den Außentemperaturen. Es kann nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass die vermutete Elastizität des Gebäudes nicht mit der Bewegung des Gebäudes selbst zu erklären ist sondern in den Messtoleranzen des Prüfgeräts begründet liegt.

#### 4.4.2 Dichtigkeit der Fassade

Die gewonnenen Erkenntnisse über die Wirkungsweise der Dichtschlämme lassen eine komplikationsfreie Anwendung erwarten. Dennoch ist eine wöchentliche Begutachtung der Fassade durchzuführen. Hierbei werden in regelmäßigen Abständen kleine Risse entdeckt, welche unverzüglich zu schließen sind. Diese Risse treten ausschließlich an den Plattenübergängen auf und haben eine Breite von maximal  $1\text{mm}$ . An diesen Stellen treten scheinbar größere Verformungen auf, als das relativ flexible Dichtmaterial abfangen kann. Abbildung 4.31 links zeigt einen solchen Riss auf der Dachfläche.



**Abbildung 4.31:** Risse im Dichtmaterial infolge Materialbewegung (links) und aufgrund mangelnder Klebekraft des darunter liegenden Papier-Klebebands (rechts)

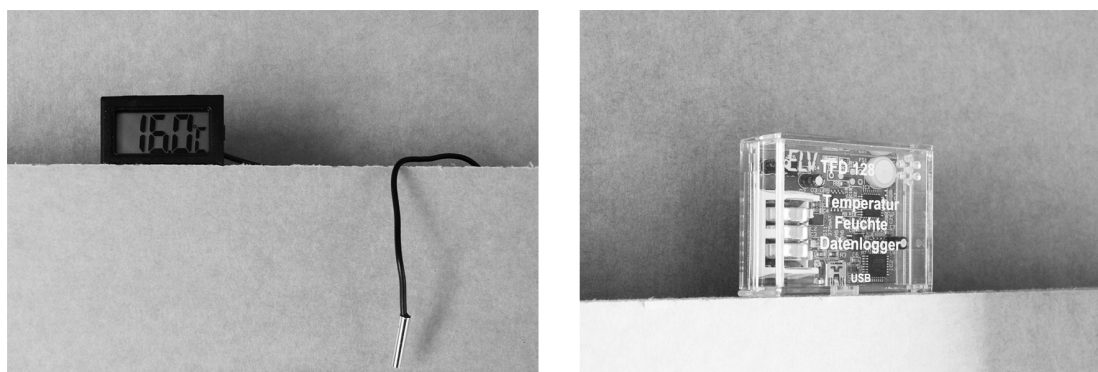
Neben den oben beschriebenen feinen Rissen treten am Gebäude auch größere Schäden auf. Hierbei ist anzumerken, dass nicht alle Fugen mit dem in Abbildung 4.21 rechts dargestellten Gewebeband abgedichtet sind, da hierfür nicht ausreichende Mengen zur Verfügung stehen.

An den verbleibenden an den Stirnseiten erfolgt die Fugenüberbrückung mit Papierklebeband.<sup>32</sup> Diese Methode ist günstig und schnell umzusetzen. Die Klebekraft scheint jedoch mit der Zeit nachzulassen und wird durch Feuchtigkeit und Temperaturschwünge weiter negativ beeinflusst. Dies zeigt Rissbilder, wie sie in Abbildung 4.31 rechts dargestellt sind und führt zu der Erkenntnis, dass der Fugenüberbrückung eine sehr große Aufmerksamkeit zu schenken ist, um frühzeitige Rissbildung zu vermeiden. Auch ist erhöhter Materialauftrag der Dichtschlämme anzuraten, da hierdurch die Bauteilbewegungen noch effizienter abgefangen werden können. Die Spaltüberbrückungen sind ohne Ausnahme mit dem empfohlenen Gewebedichtband auszuführen.

#### 4.4.3 Reaktion des Gebäudes auf Klimawechsel

Das dauerhafte Monitoring des Experimentalbaus erfolgt durch den Einsatz von zwei getrennten Systemen zur Erfassung der Umweltdaten und ermöglicht so die Dokumentation der Reaktion des Gebäudes auf wechselnde Umweltbedingungen. Das erste System dient der Ermittlung von Feuchte- und Temperaturwerten mithilfe mobiler Datenlogger. Die zweite Messeinrichtung erfasst den Wärmestrom durch die Fassade zu Ermittlung des Wärmedämmwerts der Konstruktion.

Zur direkten Ablesung der Temperaturdaten im Innenraum des Gebäudes kommen Messfühler mit Temperaturanzeige zum Einsatz. Hierfür werden drei digitale Messfühler (siehe Abb. 4.32 links) mit kabelgebundener Messelektrode und LCD-Display in den Höhen 50cm, 125cm und 200cm im Innenraum installiert. Ein weiterer Fühler wird im Außenraum platziert. Die Geräte verfügen über eine Auflösung von  $0,1^{\circ}\text{C}$  und eine Messgenauigkeit von  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ . Abbildung 4.32 links zeigt einen der drei Messfühler und seine Messelektrode.



**Abbildung 4.32:** Temperaturmesser zur visuellen Ablesung (links) und Einzelsensor zur Erfassung von Temperatur und Luftfeuchte (rechts)

<sup>32</sup>Das Papierklebeband 57180 der Firma Tesa ist in einer Breite von 50mm erhältlich, besteht aus 60% biobasiertem Material und ist frei von Lösungsmitteln.

Mit dieser einfachen Methode sind bereits analysierende Aussagen zum Verhalten des Gebäudes möglich. So wird beispielsweise im Innenraum während der Heizphasen ein Temperaturgefälle von  $>3^{\circ}\text{C}$  zwischen dem tiefsten und dem höchsten Messpunkt festgestellt.<sup>33</sup> In Phasen ohne Beheizung sinkt dieses Gefälle auf durchschnittlich  $2,5^{\circ}\text{C}$  in den Frühlingsmonaten und auf  $<2^{\circ}\text{C}$  im Winter. Dadurch wird bereits durch den Temperaturvergleich an drei unterschiedlichen Höhen die Trägheit und damit die Fähigkeit zur Wärmespeicherung aufgezeigt.

### 1. Einzelsensoren zur kombinierten Erfassung von Temperatur und Feuchte

Für autonome Messungen in beengten Bereichen werden mobile Datenlogger TFD 128 der Firma ELV Elektronik AG eingesetzt. Diese Geräte sind äußerst kompakt aufgebaut und besitzen neben den beiden Sensoren für Temperatur und Feuchte eine eigene kleine Rechneinheit mit integriertem Speicher. Abbildung 4.32 rechts zeigt einen dieser Messgeräte.

### Material und Methoden

Die Auflösung der Temperaturmessung beträgt  $0,1^{\circ}\text{C}$  bei einer Genauigkeit von  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ . Die Luftfeuchte wird von 0 – 99% mit einer Genauigkeit von 1% erfasst. Die Geräte verfügen über eine eigene Stromquelle und sind somit auch im Fassadenzwischenraum zu installieren. Das Messintervall beträgt 5 Minuten und legt je einen Wert für Temperatur und Luftfeuchte im internen Speicher ab.

### Durchführung

Zur Evaluierung stehen fünf Messfühler zur Verfügung, wovon drei im Fassadenzwischenraum installiert sind. (Geräte 1,2,3) Ein weiterer zeichnet die Werte im Innenraum des Gebäudes auf. (Gerät 4) Um die gewonnenen Werte in ein Verhältnis setzen zu können, erfolgt die Messung der Außenwerte mit dem fünften Sensor. (Gerät 5) Abbildung 4.46 auf Seite 202 zeigt die Positionen der vier am und im Gebäude installierten Messgeräte. Die Aufzeichnung wird einzeln pro Gerät durch Verbindung mit einem Computer und der notwendigen Steuersoftware gestartet. Die Messung erfolgt bis zum manuell durchgeführten Stopp durch den Anwender. Die erfassten Datenreihen werden mit Zeitstempel gespeichert und können anschließend der Auswertung zugeführt werden.

### Ergebnisse

Die gewonnenen Daten sind vielfältig zu analysieren und können in unterschiedlichen Zusammenhängen betrachtet werden. Für eine sinnfällige Evaluierung des Experimentalggebäudes werden zwei Strategien verfolgt:

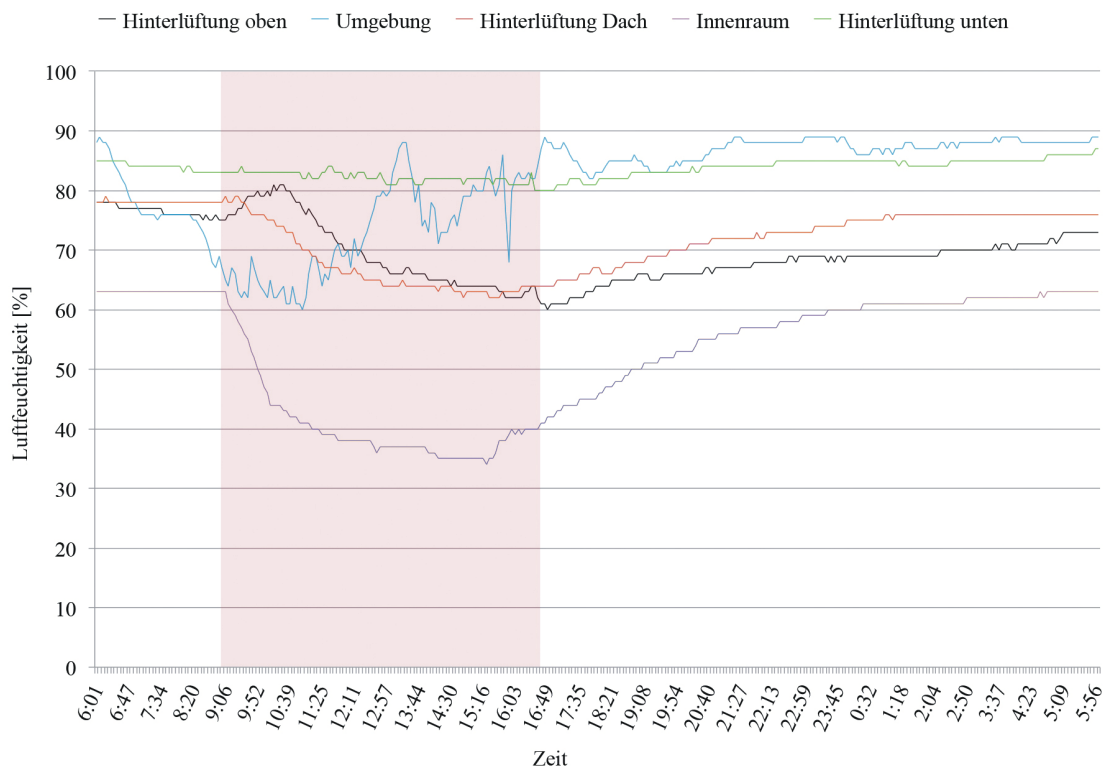
1. Bewertung der Luftfeuchte im unteren und oberen Fassadenzwischenraum sowie in der Hinterlüftungsebene im Dach im Vergleich mit den Umgebungsdaten.
2. Vergleich der Temperaturwerte von Innen- und Außenraum während der Beheizung.

---

<sup>33</sup>Zur Beheizung des Innenraums kommt ein handelsüblicher Elektroheizer mit einer Leistung von 2.000W zum Einsatz.

### Vergleich der Luftfeuchten

Die gewonnenen Ergebnisse lassen Rückschlüsse zu, wie weit die Umgebungsfeuchte in den Fassadenzwischenraum eindringt, bevor diese durch die Zwangslüftung abgetrocknet wird. Abbildung 4.33 zeigt die Kurvenverläufe von vier gemessenen Luftfeuchten in einem Zeitraum von 24h am 29.01.2015. Die Heizphase ist eingefärbt dargestellt und zu Vergleichszwecken ist auch die Kurve des Innenraums abgebildet.

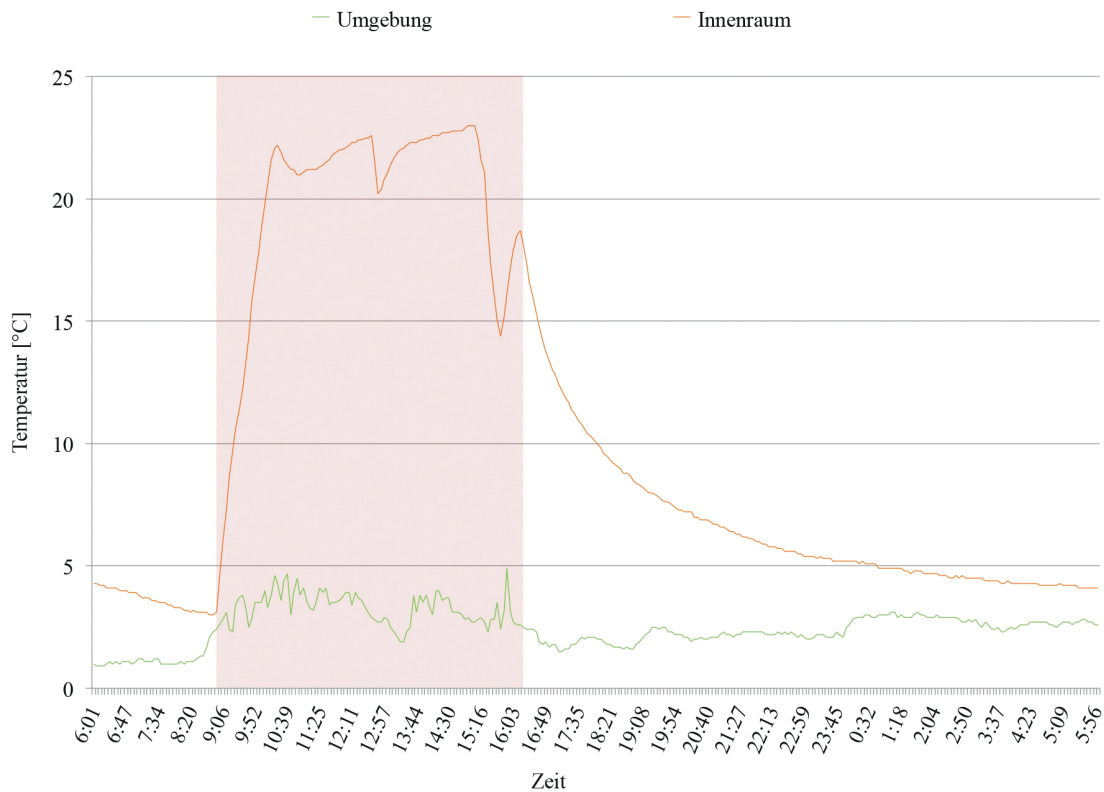


**Abbildung 4.33:** Vergleich von vier gemessenen Luftfeuchtwerten am 29.01.2015

Die Umgebungsfeuchte schwankt im Tagesverlauf stark. Die Werte von oberer Wand und Dach sind nahezu identisch und zeigen über den Tag eine Absenkung von 78% auf 60%. Dies ist auf die Erhöhung der Luftgeschwindigkeit im Zwischenraum durch Sonneneinstrahlung zurückzuführen. Der gleichmäßige Kurvenverlauf steigt zum Abend wieder an und untermauert diese These. Die Luftfeuchte im unteren Fassadenzwischenraum bleibt relativ beständig in einem Bereich von 81 – 85%. Sie ist demnach etwa genauso groß, wie der Durchschnittswert der Umgebung, weist im Gegensatz dazu jedoch eine hohe Konstanz auf. Basierend auf diesen Werten wird postuliert, dass die Hinterlüftung während des Tages durch die Thermik des Zwischenraums sehr gut funktioniert und die oberen Bereiche um bis zu 20 Prozentpunkte abtrocknen. Außerdem zeigt das Diagramm, dass die Heizphase keinen Einfluss auf die Feuchtwerte in der Hinterlüftungsebene hat. Dies bedeutet, dass die Dämmung effizient arbeitet und keine Wärme nach außen abgibt, was zu einer Trocknung der Luft im Zwischenraum führen würde.

### Vergleich der Temperaturwerte

Werden die Temperaturverläufe von Innenraum und Umgebung während einer Heizphase gegenübergestellt, sind die Aufheizphase und die Abkühlphase ablesbar. Letztgenannte zeigt die Trägheit der Konstruktion, also die Fähigkeit der Wärmespeicherung an. Zusätzlich sind in der Kurve des Innenraums die Öffnungen der großen Türen erkennbar. Abbildung 4.34 erlaubt den Vergleich.



**Abbildung 4.34:** Gegenüberstellung von Außen- und Innentemperatur

Die Temperaturkurve steigt direkt nach Start des Heizvorgangs steil an. Bei einer Außentemperatur von 4°C erwärmt sich der Innenraum innerhalb von 90 Minuten auf 20,2°C. Die Öffnung der Türen aufgrund von Kontrollgängen zeigt sich sofort als negativer Ausschlag. Die höchste gemessene Temperatur beträgt 23°C. Mit dem Ende des Heizprozesses beginnt die Kurve relativ schnell zu sinken und nähert sich der Außendurchschnittstemperatur von 2°C an. Die Speicherfähigkeit des Gebäudes ist somit relativ gering und somit auch die Phasenverschiebung des Wandmaterials. Die Verschiebung wird nicht exakt angegeben, da hierfür die Temperaturen von Innen- und Außenoberfläche des Wandmaterials zu messen sind. Im Sommer 2015 wird deshalb eine Messreihe zur Bestimmung dieses Wertes durchgeführt. Dabei wird ermittelt, wie lange die innere Oberfläche der Wabenplatte benötigt, bis sie die Außentemperatur erreicht hat.

## 2. Rechnergesteuertes Monitoringsystem zur Ermittlung des Wärmedämmwerts

Für die Ermittlung des Wärmedämmwerts ist der Wärmestrom zu ermitteln, welcher während der Beheizung durch die Wabenwand an den kalten Außenraum übergeht.

### Material und Methoden

Für die Erfassung des Wärmestroms kommt eine Wärmeflussplatte mit Abmessungen 120 x 120 x 1,5mm zum Einsatz.<sup>34</sup> Bei einer Nenntemperatur von 23°C beträgt die Messgenauigkeit 5%. Das Messverfahren beruht auf der so genannten *Hilfswandmethode*. Hierbei wird die Wärmeflussplatte direkt auf der Wandoberfläche platziert und mit Klebeband fixiert. Abbildung 4.35 zeigt den Versuchsaufbau.



**Abbildung 4.35:** Wärmeflussplatte zur Erfassung des Wärmestroms an der Wand (links) und im Detail (rechts)

Da die thermischen Eigenschaften der Wärmeflussplatte bekannt sind, wird über die gemessene Temperaturdifferenz die Wärmestromdichte  $q$  in  $\text{W}/\text{m}^2$  bestimmt. Durch Messung der Lufttemperatur auf beiden Seiten der Wand sind alle bauphysikalischen Kenngrößen zu bestimmen. Beide Temperaturen werden mit einem Thermdraht-Temperaturfühler (Modell: T 190-0) der Firma Ahlborn erfasst. Er verfügt über eine Messgenauigkeit von  $\pm 2,5^\circ\text{C}$  und ist ebenfalls in der rechten Abbildung zu erkennen.

### Durchführung

Um den Einfluss von Wärmespeichereffekten so gering wie möglich zu halten, sind Messungen über längere Zeiträume durchzuführen. Für aussagekräftige Messergebnisse soll die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenraum mindestens 20 Kelvin betragen, weshalb diese in den Wintermonaten durchgeführt werden. Idealerweise sind diese Analysen über mehrere Tage durchzuführen, um vergleichbare Mittelwerte generieren zu können. Die hier beschriebenen Messungen basieren aufgrund der nicht dauerhaft durchführbaren Beheizung auf einem Zeitraum von ca. 6 Stunden.<sup>35</sup>

<sup>34</sup>Wärmeflussplatte FQA 118 der Firma Ahlborn.

<sup>35</sup>Aus Sicherheitsgründen konnte der Experimentalbau nur am Tag unter Aufsicht beheizt werden. Dadurch existieren keine Messreihen über mehrere Tage.

Durch die eingeschränkte Beheizbarkeit des Pavillons sind keine absolut gesicherten Messwerte möglich, doch reichen diese dennoch aus, um die Kenndaten des Materials zu bestimmen. Dies erfolgt über die Ermittlung der Wärmestromdichte  $q$ . Sie ist nach Ermittlung der Innentemperatur  $\theta_i$  und der Außentemperatur  $\theta_e$  mit folgender Formel zu bestimmen:

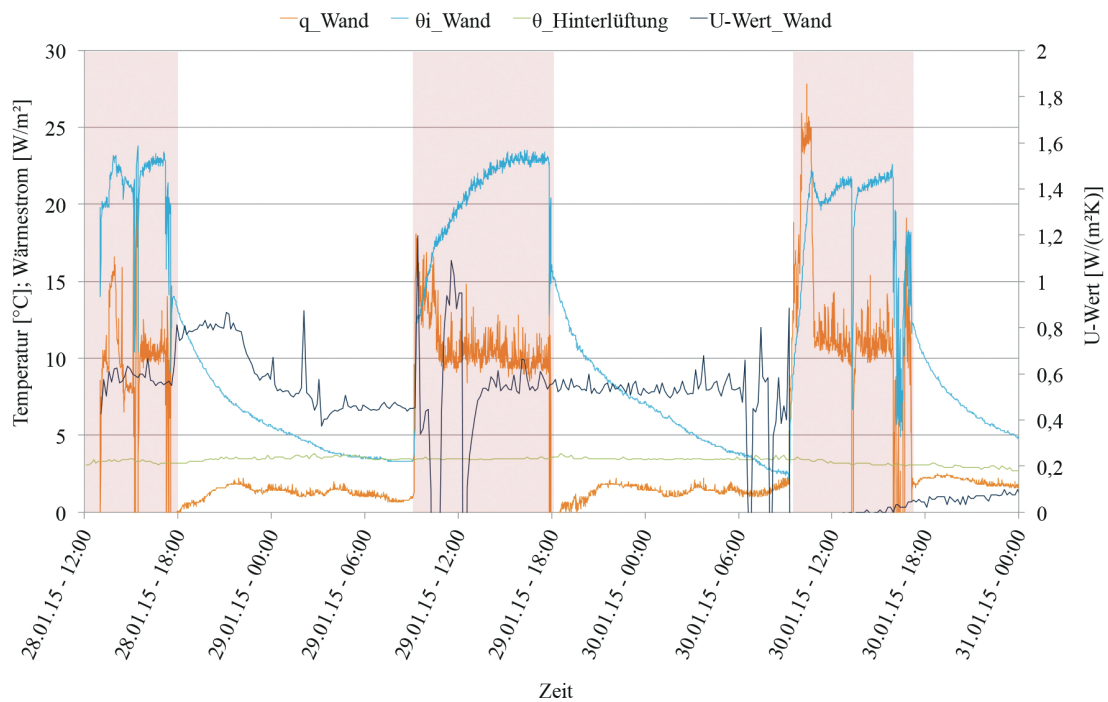
$$q = U \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (4.4)$$

Zur Ermittlung des U-Werts ist die Formel umzustellen:

$$U = \frac{q}{(\theta_i - \theta_e)} \quad (4.5)$$

### Ergebnisse

Nach Durchführung von mehreren Messreihen im Januar 2015 werden zwei repräsentative Intervalle an zwei aufeinanderfolgenden Tagen mit Beheizung analysiert. In Abbildung 4.36 sind dies die beiden linken hellblauen Kurvenverläufe. Zur Verifizierung der Werte wird ein längerer Gesamtzeitraum ausgewertet, welcher die beiden Intervalle einschließt. Dabei werden U-Werte von 0,53 – 0,59 ermittelt. Die Messzeiträume und die Ergebnisse sind Tabelle 4.12 auf Seite 208 zu entnehmen. Abbildung 4.36 zeigt das Gesamtintervall sowie die Kurvenverläufe und die eingefärbten Heizphasen.



**Abbildung 4.36:** Auswertung der Messintervalle zur Ermittlung des U-Werts

Da die in diesem Verfahren ermittelten Ergebnisse leicht differieren, wird ein für alle gültiger U-Wert von  $<0,6$  angegeben. Um die Ergebnisse einordnen zu können, wird auf Basis von Angaben des Herstellers ein theoretischer Vergleichswert ermittelt. Dies geschieht auf Grundlage der DIN EN ISO 6946. Die Firma Kiwa Bautest gibt den  $\lambda$ -Wert der SWAP-Platte mit 0,0822 an.<sup>36</sup> Damit ist der Wärmedurchlasswiderstand  $R$  zu berechnen, welcher sich aus dem Quotienten der Materialstärke von 9cm und  $\lambda$  ergibt:

$$R = \frac{d}{\lambda} = \frac{0,0822}{0,09} = 1,09 \frac{m^2 K}{W} \quad (4.6)$$

Mithilfe dieses Zwischenergebnisses ist der Wärmedurchgangswiderstand  $R_T$  zu ermitteln. Er setzt sich aus der Summe des Durchlasswiderstands und der beiden Wärmedurchgangswiderstände  $R_{si}$  und  $R_{se}$  zusammen. Diese sind aus der oben genannten Norm entnommen. Die Formel lautet:

$$R_T = R_{si} + R + R_{se} = 0,13 + 1,09 + 0,13 = 1,35 \frac{m^2 K}{W} \quad (4.7)$$

Der rechnerische U-Wert ergibt sich aus dem Kehrwert von  $R_T$ :

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{1,35} = 0,74 \frac{W}{m^2 K} \quad (4.8)$$

Es wird festgestellt, dass das theoretisch ermittelte Ergebnis von dem am Gebäude bestimmten Wert abweicht. Dies ist auf die der Norm entnommenen Werte Wärmedurchgangswiderstände zurückzuführen, denn die dort festgelegten idealisierten Bedingungen werden am Experimentalbau nicht erreicht. Dort wird beispielsweise von einer Luftzirkulation an beiden Oberflächen des getesteten Materials ausgegangen, welche nur in der Hinterlüftung gegeben ist. Zur exakteren Bestimmung des U-Wertes hätten die exakten Oberflächentemperaturen von (innen und außen) in die Berechnung einfließen müssen. Die gewonnen Ergebnisse eignen sich dennoch, um die Leistungsdaten des Gebäudes einzuordnen und dieses zu evaluieren. Die Kurvenverläufe geben das Verhalten der Konstruktion während der Heizphasen äußerst detailliert wieder. So ist der kontinuierliche Anstieg der mittleren Kurve in Abbildung 4.36 auf die Aufheizphase des Gebäudes ohne Türöffnung zurückzuführen. Die beiden anderen Graphen zeigen einen wesentlich inhomogenen Verlauf was auf eine schnelle Abkühlung des Innenraums nach der Türöffnung schliessen lässt. Dies ist nachvollziehbar, wenn die relativ großen Türen mit dem sehr kleinen Raum und der geringen Speichermasse verglichen werden.

---

<sup>36</sup>Messreihe der Kiwa Bautest Dresden GmbH am 15.10.2009.

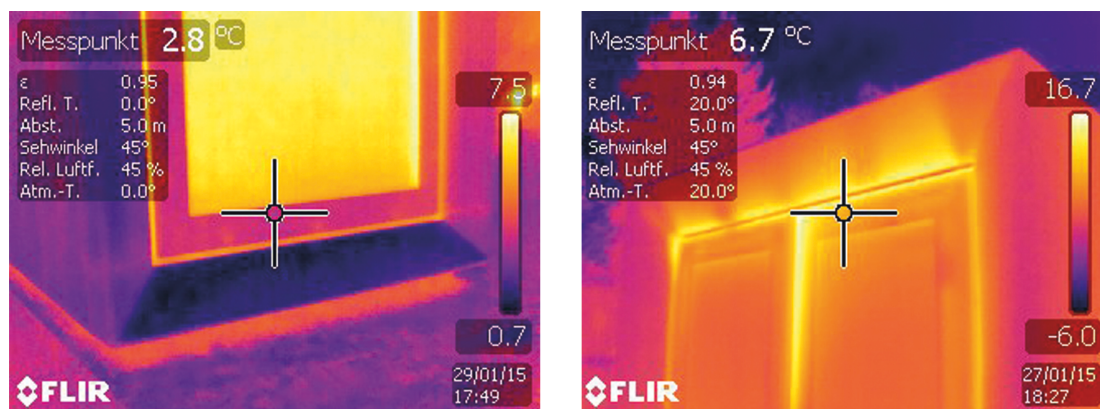


## 4.5 Bewertung des Experimentalbaus

Die beschriebene Konstruktionsweise bestätigt ihre Wirksamkeit während der nahezu einjährigen Evaluierung, was zu einer äußerst positiven Bilanz führt. Der erfolgreiche Einsatz der Wabenplatten als konstruktive wie auch bauklimatische Bauteile widerlegt vorherige Bedenken. Trotzdem ist ein Optimierungspotential auszumachen, da der Experimentalbau nicht alle an ihn gestellten Aufgaben zur Zufriedenheit zu lösen vermag. Ob er diese Ansprüche allumfassend erfüllen muss, liegt dabei im Auge des Betrachters und den definierten Rahmenbedingungen. Dabei ist zu berücksichtigen, welche Leistungen mit diesem fast vollständig aus Recyclingpapier bestehenden Gebäude erzielt werden. Die Weiterführung der Experimente und die Weiterentwicklung der Geometrien wird angestrebt, wofür nachfolgend einige Empfehlungen ausgesprochen werden.

### 4.5.1 Beurteilung des Dämmverhaltens

Die eingesetzten Wabenplatten besitzen sehr gute Wärmedämmwerte. Dies belegen Messungen und Bilddokumentationen mit einer Thermographiekamera am 27.01.2015 und 29.01.2015. Die dunkelblauen Fassadenbereiche in 4.37 links zeigen die Leistungsfähigkeit der Konstruktion. Schwächere Werte liefern die Stirnseiten der Fassade. Die Anschlusspunkte der Türen und die experimentelle Folienfassade aus ETFE weisen Wärmeverluste auf. Dies ist in der rechten Abbildung sehr gut zu erkennen.



**Abbildung 4.37:** Thermographieaufnahmen von der Folienfassade (links) und dem Bereich der Portaltüren (rechts)

Bei der Bewertung ist zu berücksichtigen, dass die Türen keine handelsüblichen Elemente sind. Sie wurden von den Studierenden selbst in den universitären Werkstätten hergestellt und weisen deshalb kleinere Fugen auf, welche nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand zu schließen sind. An diesen Stellen entweicht Wärme. Hervorzuheben ist die Beschränkung der Problematik auf den Spaltbereich, denn die Türblätter selbst dämmen durch die Integration von Wabenmaterial sehr gut. Die Gesamtkonstruktion weist mit einer Dämmstärke von lediglich 9cm sehr gute Werte auf. Dies wird messtechnisch und rechnerisch bestätigt.

### 4.5.2 Optimierungsvorschläge

Die positive Evaluierung des Experimentalbaus erfüllt die zu Beginn an das Vorhaben gestellten Erwartungen. Dennoch können aus den objektiven Ergebnissen und den subjektiven Erfahrungen einige Verbesserungsvorschläge abgeleitet werden.

#### **Lehre zur Bauteilfügung**

Die Vorfertigung der Rahmen aus gefalteten Wabenplatten geht ohne Probleme vonstatten. Die Bauteilfügung vor Ort ist technisch machbar und mithilfe von Spanngurten zu realisieren. Für eine kleine Serienproduktion dieser Elemente empfiehlt sich der Aufbau einer Lehre zur effizienten Verbindung von Knotenpunkten und linearen Bauteilen.

#### **Erhöhung der Spannweite**

Größere Spannweiten als jene des Experimentalbaus sind denkbar, doch sind in diesem Fall versteifende Elemente in den Fügepunkten einzuplanen. Diese bestehen bestenfalls aus Wabenplatten und werden an den mittlerweile bekannten Schwachstellen verstärkt eingesetzt. Zur Verarbeitung von Platten mit größeren Abmessungen wird die Kooperation mit dem Hersteller empfohlen.

#### **Haltesystem des Fassade**

Um die Aufschüsselung der Fassadenplatten zu minimieren, sind die Achsabstände der Unterkonstruktion zu reduzieren. Eine Möglichkeit der Optimierung besteht dabei in der Reduzierung bzw. Abschaffung der Holzbauteile, welche durch Wabenplatten ersetzt werden könnten.

#### **Ertüchtigung der Knotenpunkte**

Auf die in den Knotenpunkten der Rahmen zusätzlich eingebrachten Versteifungsecken aus Multiplex kann bei Anpassung der Konstruktionsform und bei erfolgreicher Testierung von Prototypen verzichtet werden.

#### **Überbrückung der Fassadenfugen**

Der Fugenüberbrückung ist besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Es wäre beispielsweise zu klären, ob sich das Decklinerpapier als Fugenüberbrückung eignet, sofern die Befestigung so elastisch ausgeführt wird, dass Bauteilbewegungen ausgeglichen werden. Silikon würde sich hier anbieten, doch darf es nicht aus den Fugen heraustreten, da es ein schlechter Haftgrund für einige Fassadenbeschichtungen darstellt.

#### **Alternativen für die Fassade**

Für die Herstellung einer alternativen wasserführenden Fassadenschicht sind viele Möglichkeiten denkbar. Diese reichen von Putzen über Fassadentafeln, Schindeln oder eine vollständige Kaschierung mit wasserdichten Folien. Wird ein Putzmaterial aufgebracht, ist vor allem auf die Reduzierung der Fugenbreite der Platten zu achten. Das aufgebrachte Material muss spaltüberbrückend und schnelltrocknend sein, um eine unnötige Befeuchtung der Papieroberfläche zu verhindern.

### Mängelvermeidung an der Fassadenkonstruktion

Lediglich zwei Feuchteschäden sind am Gebäude aufgetreten, welche auf eine unsachgemäß angebrachte Fugenüberbrückung zurückzuführen sind. Hierbei wurde der beschädigte Bereich großzügig entfernt, da die Papierstruktur die Feuchte wie ein Schwamm aufsaugt und dadurch ihre eigene Integrität schwächt. Das Risiko einer Beschädigung durch Nässe ist durch ordnungsgemäß ausgeführte Details leicht zu reduzieren. Die im Fassadenbild ablesbaren Plattenkanten sind auf die minimale Aufschüsselung derselben zurückzuführen. Dies wird durch weitere Haltepunkte sowie die Behandlung der Plattenrückseite minimiert. Die Fassadenabdichtung mittels Dichtschlämme im Plattenbereich wird als sehr wirkungsvoll bewertet. Unter Berücksichtigung folgender Punkte sind auch die Fugen dauerhaft und sicher zu realisieren:

- Minimierung der Fugendimensionen
- Maximierung der Anschlussflächen an der Haltekonstruktion
- Saubere Fugenüberbrückung mit gummierten Dichtband ohne Ausnahme
- Korrekter und großzügiger Auftrag der Dichtschlämme im Fugenbereich
- Zweischichtiger Auftrag (in besonderen Fällen sind drei Schichten anzuraten)
- Ausführung einer hinterlüfteten Fassade

Die Gefahr einer Materialschwächung durch Feuchteintrag wie Nebel oder Tau wird als gering eingestuft. Lediglich die teilweise sichtbare Strukturierung der zum Fassadenzwischenraum ausgerichteten Deckliner zeugt von einer Adsorption von Feuchte, welche durch die effiziente Belüftung jedoch schnell abtrocknet und zu keiner statischen Beeinflussung des Materials führt. Die gemessenen Feuchtwerte im Fassadenzwischenraum lassen auf einen Feuchteintritt in das Wabenmaterial schließen, der sich jedoch nicht negativ auf die Tragfähigkeit der Fassadenkonstruktion auszuwirken scheint. An dieser Stelle würde sich der Einsatz der beschriebenen PE-kaschierten Wabenplatten anbieten. Diese bieten einen Feuchteschutz und arbeiten durch die Kaschierung gegen die Aufschüsselung der Fassadentafel.

### 4.5.3 Einordnung nach ökologischen Gesichtspunkten

Hinsichtlich der Nachhaltigkeit ist zwischen Wabenplatte und Dichtschlämme zu unterscheiden. Das Wabenmaterial und der getestete Deckliner sind über jeden Zweifel erhaben, da sie eine positive Umweltbilanz aufgrund eines hohen Recyclingfaktors mit sehr guten Leistungsdaten kombinieren. Der Nachteil der Wasserempfindlichkeit wird mithilfe von einfachen Abdichtungsmaßnahmen ausgeglichen und die hohe Variantenvielfalt der entwickelten Bauteile eröffnet neue Anwendungsszenarien im Bausektor. Das Recycling der Wabenplatten erfolgt ohne Rückstände im Kreislauf. Lediglich der eingebrachte Leim ist auf seine ökologischen Kenndaten hin zu überprüfen und ggf. anzupassen.

Die Zweikomponenten-Dichtschlämme ist als Kunstharzdispersion auf Polystyrolacrylatbasis den wenig nachhaltigen Kunststoffen zuzuordnen. Somit verschlechtert sie zunächst die Umweltbilanz des Gebäudes. Da die Schlämme mit dem Deckliner eine so stabile Verbindung eingeht, dass Rissversuche zur Ablösung des Deckliners von der Kernstruktur führen, wird auch hier eine positive Prognose zur Rezyklierung der beschichteten Wabenplatten gestellt. Die Entfernung des mit der Schlämme behandelten Deckliners ist mit händischer Kraft zu bewerkstelligen und bedeutet, dass beim Rückbau des Gebäudes lediglich der äußere Deckliner abzuziehen und dem Sonderkreislauf zuzuführen ist. Der zurückbleibende Wabenkern ist somit getrennt vom Fassadenmaterial zu recyceln.

### 4.5.4 Ausblick und Ansätze für weiterführende Arbeiten

Die dargestellten Ergebnisse lassen ein breites Spektrum nachfolgender Forschungsarbeiten zu. Besonders hervorzuheben sind die Analysen gefalteter Bauteile aus alternativen Papierwerkstoffen, welche beispielsweise mit einer werksseitigen Folienkaschierung bereits hohe Nässeresistenzen aufweisen würden. Die im Experimentalbau eingesetzten Holzwerkstoffe zur statischen Ertüchtigung sind bei tiefergehender Untersuchung der Feuchteaufnahme und der statischen Belastungsgrenzen durch Wabenplatten aus Papierwerkstoffen zu ersetzen. Hierfür sind weitere Materialkennwerte zu ermitteln und in den Stand der Technik zu überführen. Die maximale Feuchtesättigung der Wabenplatten vor Verlust der Tragfähigkeit stellt ein weiteres interessantes Thema dar, welches unabhängig von Faltungen zu behandeln ist.

Die in dieser Arbeit präsentierten Ergebnisse bieten ein enormes Forschungspotential und eignen sich sehr gut zur weiteren Untersuchung der Materie. Dabei können unterschiedliche Materialstärken ebenso untersucht werden wie alternative Zusammensetzungen der Wabenplatten. Exakte Laborversuche zur Ermittlung der Tragfähigkeit verbesserter Bauteile würden die Forschung auf diesem Gebiet weit voranbringen. Die Entwicklung von Hybridbauteilen in Kombination mit anderen Werkstoffen bietet dabei ebenso interessante Lösungen wie die Konzentration auf das reine Wabenmaterial aus Papier. Die Ertüchtigung gegen Nässe und Feuer spielt dabei immer die zentrale Rolle. Nicht zuletzt ist die nahtlose Anbindung der digitalen Formfindung mithilfe parametrischer Werkzeuge an die Produktionslinie des Herstellers der Wabenplatten weiter zu untersuchen und zu verbessern. Denkbar ist ein Geometrikatalog, welcher die einzelnen Querschnitte auflistet und sofort parametrisch zur Verfügung stellt. Ganze Rahmenbauteile nebst der Knotengeometrien können so abgewickelt und effizient produziert werden. Eine Analyse der zur Verfügung stehenden digitalen Planungswerkzeuge würde eine wichtige Basis zur Etablierung plattformübergreifender Schnittstellen liefern. Die Programmierung eines eigenen Software-Tools zur Generierung der Träger und Ausgabe der Abwicklungen reduziert den Planungsaufwand und die Kosten erheblich. Diese Maßnahmen können unter anderem über die erfolgreiche Etablierung der entwickelten Bauteile am Markt und die Akzeptanz in der Gesellschaft entscheiden, weshalb eine weiterführende Forschung empfohlen wird.

# Schautafeln



**Abbildung 4.38:** Der Experimentalbau *OpenSource: Cardboard* mit seiner südlichen Folienfassade





**Abbildung 4.39:** Die geöffneten Drehtüren



**Abbildung 4.40:** Westansicht des Gebäudes



**Abbildung 4.41:** Innenraum mit Folienfassade



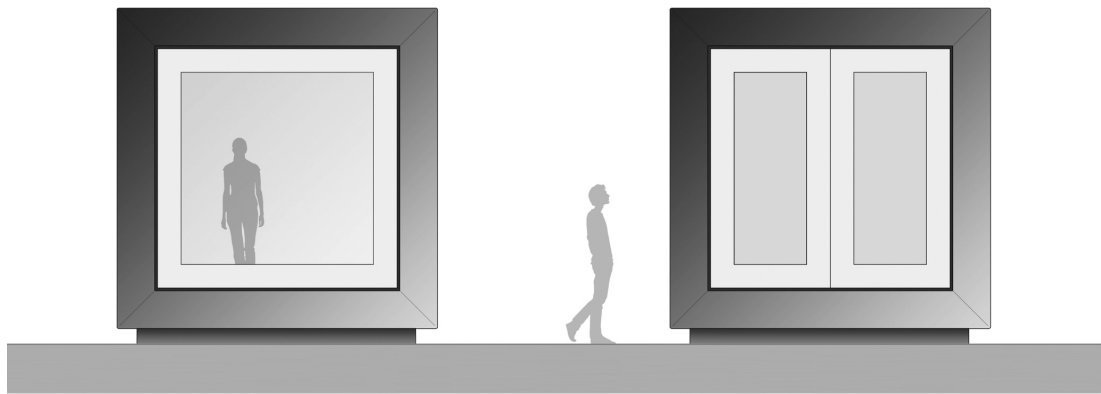
**Abbildung 4.42:** Die Struktur des Tragwerks





**Abbildung 4.43:** Der Experimentalbau im Winter

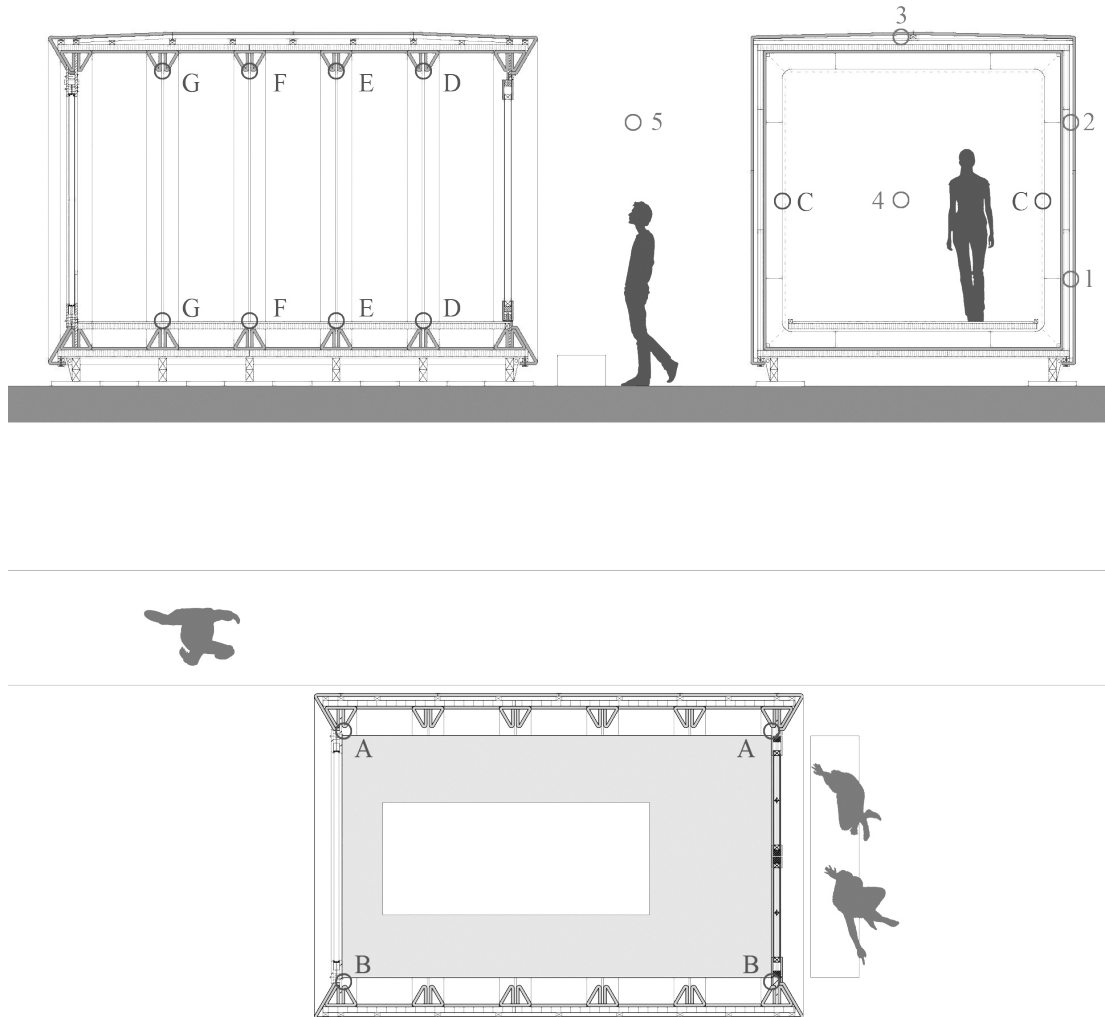




**Abbildung 4.44:** Ansichten der Folienfasse und der Eingangsfassade (ohne Maßstab)



**Abbildung 4.45:** Seitenansicht des Experimentalbaus (ohne Maßstab)



**Abbildung 4.46:** Längsschnitt (oben links), Querschnitt (oben rechts) und Grundriss (unten) des Experimentalbaus (ohne Maßstab). Rot markiert sind die Positionen der Messpunkte zur Überprüfung von Länge, Breite und Höhe. Grün markiert sind die Positionen der Sensoren zur Erfassung von Temperatur und Feuchte.

# Tabellen

Profil	Bezeichnung	Wellenteilung t in mm	Wellenhöhe h in mm
O	Grafikwelle	1,3	0,3
N	Grafikwelle	1,6 – 1,8	0,4 – 0,6
G	Grafikwelle	≤1,8	≤0,55
F	Feinstwelle	1,9 – 2,6	0,6 – 0,9
E	Mikrowelle	3,0 – 3,5	1,0 – 1,8
D	Midiwelle	3,8 – 4,8	1,9 – 2,1
B	Feinwelle	5,5 – 6,5	2,2 – 3,0
C	Mittelwelle	6,8 – 7,9	3,1 – 3,9
A	Grobwelle	8,0 – 9,5	4,0 – 4,9
K	Maxiwelle	≥ 10	≥ 5,0

**Tabelle 4.1:** Wellenprofile laut DIN 55468-1:2004-08

Papiersorte	Grammatur	Dicke	Berstwert	Kaschierung	Restfeuchte
Testliner	190g/m <sup>2</sup>	268 μm	374 kPa	nein	7,5 %
Kraftliner	280g/m <sup>2</sup>	348 μm	840 kPa	nein	8,0 %
Kraftersatz	300g/m <sup>2</sup>	410 μm	840 kPa	nein	7,5 %
Testliner	305g/m <sup>2</sup>	350 μm	840 kPa	ja	7,0 %
Kraftliner	350g/m <sup>2</sup>	507 μm	870 kPa	ja	8,1 %

**Tabelle 4.2:** Kennwerte aller fünf Decklinerpapiere, welche von der Firma SWAP zur Kaschierung der Wabenplatten eingesetzt werden.

Papiersorte	Grammatur-Soll	Mittelwert Messung	Abweichung
Testliner	190g/m <sup>2</sup>	190,40 g/m <sup>2</sup>	+ 0,21 %
Kraftliner	280g/m <sup>2</sup>	275,66 g/m <sup>2</sup>	– 1,55 %
Kraftersatz	300g/m <sup>2</sup>	307,98 g/m <sup>2</sup>	+ 2,66 %
Testliner	305g/m <sup>2</sup>	301,48 g/m <sup>2</sup>	– 1,15 %
Kraftliner	350g/m <sup>2</sup>	346,11 g/m <sup>2</sup>	– 1,11 %

**Tabelle 4.3:** Soll- und Ist-Grammaturen von fünf Decklinerpapieren.

Papiersorte	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Mittelwert
190MD	0,147	0,150	0,158	0,147	0,146	0,150
280MD	0,366	0,416	0,379	0,398	0,383	0,389
300MD	0,354	0,361	0,375	0,370	0,374	0,367
305MD	0,401	0,398	0,419	0,410	0,390	0,403
350MD	0,449	0,441	0,455	0,453	0,444	0,450
380 MD	0,381	0,362	0,371	0,343	0,374	0,366
190CD	0,071	0,068	0,072	0,068	0,070	0,070
280CD	0,160	0,166	0,153	0,165	0,159	0,161
300 CD	0,138	0,147	0,143	0,141	0,145	0,143
305CD	0,148	0,160	0,146	0,140	0,155	0,150
350CD	0,238	0,248	0,247	0,228	0,261	0,244
380 CD	0,354	0,338	0,346	0,316	0,336	0,338

**Tabelle 4.4:** Breitenbezogene Bruchkraft von fünf Decklinerpapieren in Längsrichtung MD und Querrichtung CD. Ermittelt in jeweils 5 Testreihen. Angaben in kN/15mm.

Papiersorte	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Mittelwert
190MD	4,38	4,05	4,24	4,55	4,07	4,25
280MD	5,21	5,54	5,37	5,70	5,39	5,44
300MD	5,53	5,72	6,04	5,72	5,87	5,77
305MD	5,40	5,04	5,53	5,87	4,70	5,30
350MD	5,90	5,56	5,91	5,72	5,71	5,76
380 MD	7,05	5,67	6,22	6,07	6,87	6,33
190CD	6,37	5,21	6,21	5,06	5,89	5,72
280CD	7,88	7,74	6,41	7,41	7,24	7,32
300 CD	7,74	9,07	8,38	8,38	8,40	8,38
305CD	7,73	9,04	7,06	6,38	8,05	7,60
350CD	11,89	12,23	11,89	10,70	12,56	11,84
380 CD	7,23	7,22	7,21	6,56	7,36	7,11

**Tabelle 4.5:** Breitenbezogene Bruchdehnung A von fünf Decklinerpapieren. Ermittelt in jeweils 5 Testreihen. Angaben in Millimetern.

Anzahl n	Faktor	1cm	2cm	3cm	6cm	10cm	15cm
3	0,66	$\pi \cdot 0,66$	$\pi \cdot 1,33$	$\pi \cdot 2$	$\pi \cdot 4$	$\pi \cdot 6,66$	$\pi \cdot 10$
4	0,5	$\pi \cdot 0,5$	$\pi$	$\pi \cdot 1,5$	$\pi \cdot 3$	$\pi \cdot 5$	$\pi \cdot 7,5$
5	0,4	$\pi \cdot 0,4$	$\pi \cdot 0,8$	$\pi \cdot 1,2$	$\pi \cdot 2,4$	$\pi \cdot 4$	$\pi \cdot 6$
6	0,33	$\pi \cdot 0,33$	$\pi \cdot 0,66$	$\pi$	$\pi \cdot 2$	$\pi \cdot 3,33$	$\pi \cdot 5$
8	0,25	$\pi \cdot 0,25$	$\pi \cdot 0,5$	$\pi \cdot 0,75$	$\pi \cdot 1,5$	$\pi \cdot 2,5$	$\pi \cdot 3,75$
12	0,16	$\pi \cdot 0,16$	$\pi \cdot 0,33$	$\pi \cdot 0,5$	$\pi$	$\pi \cdot 1,66$	$\pi \cdot 2,5$
18	0,11	$\pi \cdot 0,11$	$\pi \cdot 0,22$	$\pi \cdot 0,33$	$\pi \cdot 0,66$	$\pi \cdot 1,11$	$\pi \cdot 1,66$
24	0,083	$\pi \cdot 0,083$	$\pi \cdot 0,16$	$\pi \cdot 0,25$	$\pi \cdot 0,5$	$\pi \cdot 0,83$	$\pi \cdot 1,25$

**Tabelle 4.6:** Streifenbreite der Decklinerentfernung anhand acht verschiedener n-Ecke unter Berücksichtigung sechs verschiedener Materialstärken in Vielfachen von  $\pi$ .

Zelle	Inhalt	Formel
F2	Gegenkathete a	= B8-2*B4
F3	Hypothenuse b	= $WURZEL(F2^2 + F4^2)$
F4	Ankathete c	= B6/2-2*B4
F5	Decklinerentfernung $l_\alpha$	= $PI()*B4*((180-(ARCTAN(F4/F2)*180/PI()))/180)$
F6	Decklinerentfernung $l_\beta$	= $PI()*B4*((180-F8)/180)$
F7	Winkel $\alpha$	= $ARCTAN(F4/F2)*180/PI()$
F8	Winkel $\beta$	= 180-90-F7
J2	Gesamtbreite	= $(F2+F3+F4+B4+F5+F6)*2$
J4	Breitenüberschreitung	= WENN(J2>B2;J2-B2; " ")
J6	Breite der Restfläche	= WENN(J2<B2;(B2-J2); " ")
K4	"Ja"bzw. "Nein"	= WENN(J2>B2;"mm";"Nein")
K8	"Ja"bzw. "Nein"	= WENN(J2<B2;"Ja";"Nein")

**Tabelle 4.7:** Zellinhalte der Exceltabelle aus Abbildung 3.36 auf Seite 135 zur Bestimmung von Bauteildimensionen

Zelle	Inhalt	Formel
F2	Quadratdiagonale $d_Q$	= B6*WURZEL(2)
F3	Pyramidenhöhe h	= B4/4
F4	Pyramidenkante k	= $WURZEL((B4^2)/16 + (F2^2)/4)$
F5	Eckwinkel $\delta$	= $180 - (ARCCOS(1 - (F4^2)/(2 * B6^2))) * 180/PI()$
F6	Dreiecksseite w	= $B6*SIN(F5*PI()/180)$
F7	Schnittwinkel $\alpha$	= $180-90-(J2/2)$
J2	Schenkelwinkel $\gamma$	= $ARCCOS(1 - (F2^2)/(2 * F6^2)) * 180/PI()$
J4	Ausschnittsabstand z	= $B2*TAN(F7 / 180* PI())$

**Tabelle 4.8:** Zellinhalte der Exceltabelle aus Abbildung 3.50 auf Seite 148 zur Bestimmung von Schenkelwinkel und Schnittwinkel

Ablesezeit in Minuten	Drittelpunkt	Mittelpunkt
Ausgangswert	0	0
sofort nach Belastung	3,7	4,5
3	4,4	5,0
10	4,8	5,6
sofort nach Entlastung	1,3	1,8

**Tabelle 4.9:** Verformung eines horizontalen Trägers infolge maximaler Schneelast. Die Messung erfolgt sofort nach Belastung sowie nach 3 und 10 Minuten. Die letzte Messung zeigt die Rückverformung infolge Entlastung. Angaben in cm.

Ablesezeit in Minuten	Außenpunkt	Drittelpunkt	Mittelpunkt
Ausgangswert	0	0	0
sofort nach Belastung	23,8	11,3	8,9
3	24,8	12,3	9,4
5	26,1	12,8	9,8
10	27,0	13,2	10,2
15	27,4	13,5	10,4
18	27,8	13,9	10,7
nach Entlastung	17,3	7,8	5,9

**Tabelle 4.10:** Verformung eines Rahmens infolge reduzierter Windlast. Die Messung erfolgt sofort nach Belastung sowie nach 3, 5, 10, 15 und 18 Minuten. Die letzte Messung zeigt die Rückverformung infolge Entlastung. Angaben in cm.

Ablesedatum	A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G
22.07.14	4395	4384	2654	2564	2551	2566	2565
14.08.14	4396	4385	2655	2563	2548	2564	2565
02.09.14	4396	4385	2656	2564	2549	2565	2564
02.10.14	4396	4385	2656	2564	2549	2565	2562
28.10.14	4396	4385	2656	2565	2549	2564	2563
27.11.14	4396	4385	2656	2564	2549	2565	2563
17.12.14	4396	4385	2656	2564	2549	2565	2563
27.01.15	4396	4385	2656	2563	2549	2565	2562
18.02.15	4396	4385	2656	2562	2548	2564	2562
11.03.15	4396	4385	2656	2561	2546	2562	2561
15.04.15	4396	4385	2656	2560	2545	2560	2560
05.05.15	4396	4385	2656	2558	2543	2558	2559
Abweichung	+1	+1	+2	-6	-8	-8	-6

**Tabelle 4.11:** Änderung von Länge, Breite und Höhe des Experimentalbaus, Angaben in mm

Beginn der Messung	Ende der Messung	Dauer	U-Wert
28.01.15 - 13:05 Uhr	28.01.15 - 18:05 Uhr	5h	0,59
29.01.15 - 14:35 Uhr	29.01.15 - 18:05 Uhr	3,5h	0,56
28.01.15 - 13:05 Uhr	30.01.15 - 06:05 Uhr	36h	0,53

**Tabelle 4.12:** U-Werte von drei Messintervallen



# Literaturverzeichnis

- [AAB04] ALLAOUI, S., Z. ABOURA und M. BENZEGGAGH: *Elastic behavior of corrugated cardboard: experiments and modeling*. Composite Structures, 63, 2004.
- [AAB05] ALLAOUI, S., Z. ABOURA und M. BENZEGGAGH: *Study of the hygro-mechanical behavior of corrugated cardboard*. In: *7th International Conference on Sandwich Structures*, 2005.
- [AAB09] ALLAOUI, S., Z. ABOURA und M. BENZEGGAGH: *Effects of the environmental conditions on the mechanical behaviour of the corrugated cardboard*. Composites Science and Technology, 69, 2009.
- [AAB11] ALLAOUI, S., Z. ABOURA und M. BENZEGGAGH: *Contribution to the modelling of the corrugated cardboard behaviour*. Technischer Bericht, Institut PRISME/LMSP, Université d'Orléans, France, 2011.
- [AG10] ABBÈS, B. und Y. Q. GUO: *Analytic homogenization for torsion of orthotropic sandwich plates: Application to corrugated cardboard*. Composite Structures, 92, Februar 2010.
- [Alf04] ALFTHAN, J.: *Micro-mechanically based modeling of mechano-sorptive creep in paper*. Doktorarbeit, Royal Institute of Technology Stockholm, Schweden, 2004.
- [Asu03] ASUNCIÓN, J.: *Das Papierhandwerk*. Verlag Paul Haupt, Berne, 2003.
- [Aya09] AYAN, Ö.: *Cardboard in architectural technology and structural engineering: A conceptual approach to cardboard buildings in architecture*. Doktorarbeit, ETH Zürich, 2009.
- [Bar03] BARKER, D.: *House of Card*. architectureweek.com, Januar 2003.
- [Bet15] BETZ, L.: *Zellstoffverbundelement*, 2015. Firma Betz Holzbau, Webseite, <http://www.zellstoffverbundelement.com>, Abruf am 15.05.2015.
- [Bij14] BIJU, S.: *Une maison tout en carton, c'est du solide?* Habitat Naturel, 56, 2014.
- [Ble13] BLECHSCHMIDT, J. (Herausgeber): *Papierverarbeitungstechnik*. Fachbuchverlag Leipzig, 2013.
- [Bur96] BURCHARDT, L.: *Festigkeitseigenschaften einlagiger und mehrlagiger papierner Flächengebilde*. Doktorarbeit, Universität Dresden, 1996.
- [Bur03] BURNETT, G.: *The World's First Cardboard Classroom*. Permaculture Magazine, 2003.
- [Car15] CARDBOARDERS: *Foldlife Pavilion*, 2015. The Cardboarders Ltd., Webseite, <http://www.foldlife.lv>, Abruf am 15.05.2015.
- [CB97] COFFIN, D.W. und S.B. BOESE: *Tensile Creep Behavior of Single Fibers and Paper in a Cyclic Humidity Environment*. Technischer Bericht, Institute of Paper Science and Technology Atlanta, USA, 1997.
- [CKD13] CHAOS, M., M. KHAN und S. DOROFEEV: *Pyrolysis of corrugated cardboard in inert and oxidative environments*. Proceedings of the Combustion Institute, 2013.

- [Cob14] COBBERS, A.; JAHN, O.: *PREFAB HOUSES*. Taschen Verlag, 2014.
- [DET15] DETAIL, REDAKTION: *Extra schlanke Innendämmung*. Detail green, 2015.
- [DFR07] DAXNER, T., T. FLATSCHER und F.G. RAMMERSTORFER: *Optimum Design of Corrugated Board under Buckling Constraints*. In: *7th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2007.
- [DIB13] DIBT: *Schneelastzonen*. Technischer Bericht, Deutsches Institut für Bautechnik, 2013.
- [DIN05] DIN: *DIN EN 2: Brandklassen*. Beuth Verlag, Februar 2005.
- [DIN08] DIN: *DIN 53121: Prüfung von Papier, Karton und Pappe - Bestimmung der Biegesteifigkeit nach der Balkenmethode*. Beuth Verlag, Oktober 2008.
- [DIN09] DIN: *DIN EN ISO 1924-2: Papier und Pappe - Bestimmung von Eigenschaften bei Zugbeanspruchung - Teil 2*. Beuth Verlag, Mai 2009.
- [DIN10] DIN: *DIN EN ISO 6735: Papier, Pappe und Faserstoffe - Übersicht von Begriffen*. Beuth Verlag, Februar 2010.
- [DIN11a] DIN: *DIN EN ISO 3039: Wellpappe - Bestimmung der flächenbezogenen Masse der Lagen nach Trennung*. Beuth Verlag, Juni 2011.
- [DIN11b] DIN: *DIN EN ISO 6730: Papier und Pappe - Begriffe*. Beuth Verlag, Februar 2011.
- [DIN12a] DIN: *DIN EN 1991-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau*. Beuth Verlag, Dezember 2012.
- [DIN12b] DIN: *DIN EN ISO 536: Papier und Pappe - Bestimmung der flächenbezogenen Masse*. Beuth Verlag, November 2012.
- [Dud13] DUDENREDAKTION: *Duden - Die deutsche Rechtschreibung*. Bibliographisches Institut, Berlin, 2013.
- [EK11] ERHARD, K. und J. KRETZSCHMAR: *PTS Forschungsbericht 081042: Reduzierung der Feucht- und Nassdehnung von Druck- und Spezialpapieren zur Verbesserung des Dimensionsverhaltens und der Planlage bei der Verarbeitung*. Technischer Bericht, Papiertechnische Stiftung, Februar 2011.
- [EVV08] EEKHOUT, M., F. VERHEIJEN und R. VISSER (Herausgeber): *Cardboard in Architecture*. IOS Press, 2008.
- [Gab90] GABEL, A.: *Das Papier wandert von Asien nach Europa*, Band 8. Graphische Werkstätten Berlin GmbH, 1990.
- [GAP15] GAP:SKIN: *GAP-Fassade*, 2015. Firma GAP solutions GmbH, Webseite, [www.gap-solutions.at](http://www.gap-solutions.at), Abruf am 15.05.2015.
- [Gau98] GAULT, R.: *Paper Clay*. AC Black Limited, 35 Bedford Row, London, 1998.
- [Gol10] GOLDMANN, F.: *Die leichte Balance*. Kunststoffe, September 2010.
- [Göt90] GÖTTSCHING, L. (Herausgeber): *Papier in unserer Welt*. ECON Verlag, Düsseldorf, 1990.
- [Gro15] GROD, W.: *Conbou Sandwichplatte*, 2015. Firma Conbou, Webseite: <http://www.conbou.de>, Abruf am 15.05.2015.
- [GTPG08] GOOREN, L., B. THAKKAR, R. PEERLINGS und M. GEERS: *Experimental and numerical investigation of creasing in corrugated paperboard*. Philosophical Magazine, 2008.

- [GWR11] GOLLNER, M. J., F. A. WILLIAMS und A. S. RANGWALA: *Upward flame spread over corrugated cardboard*. Combustion and Flame, 2011.
- [Hes24] HESS, W. (Herausgeber): *Pappen-Verarbeitung und Papiermaché*. M. Krayn Technischer Verlag Berlin, 1924.
- [Hes30] HESS, W. (Herausgeber): *Praktisches Handbuch für das Gesamtgebiet der Pappen-Verarbeitung*. M. Krayn Technischer Verlag Berlin, 1930.
- [Hil96] HILMAR, W.: *Falten im Leichtbau*. ARCH+, 131, 1996.
- [HNT<sup>+</sup>10] HUNG, D.V., Y. NAKANO, F. TANAKA, D. HAMANAKA und T. UCHINO: *Preserving the strength of corrugated cardboard under high humidity condition using nano-sized mists*. Composites Science and Technology, 70, November 2010.
- [Hul11] HULL, T.: *Solving Cubics With Creases: The Work of Beloch and Lill*. The American Mathematical Monthly, 2011.
- [Hun78] HUNTER, D.: *Papermaking: History and Technique of an Ancient Craft*. Dover publications, 1978.
- [Ise15] ISELI, F.: *Ecocell Wabenplatte*, 2015. Firma Ecocell AG, Webseite: <http://www.ecocell.ch>, Abruf am 15.05.2015.
- [Jac05] JACKSON, P.: *Falten und Entfalten in Kunst und Design / Masters of Origami at Hangar 7*. Hatje Cantz, 2005.
- [Jac11] JACKSON, P.: *Von der Fläche zur Form*. Haupt Berne, 2011.
- [Jod99] JODIDIO, P.: *Building a new Millennium*. Taschen Verlag, 1999.
- [KCGL10] KNIPPERS, J., J. CREMERS, M. GABLER und J. LIENHARD: *Atlas Kunststoffe + Membranen*. Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH, 2010.
- [KH93] KLEINLOGEL, A. und W. HASELBACH: *Rahmenformeln*. Ernst und Sohn Verlag, 1993.
- [Kim98] KIM, D.W.: *Production of multi-ply corrugated paperboard*. European Patent Specification, November 1998.
- [Kot14] KOTTAS, D.: *New Trends in Microarchitecture*. Linksbooks, 2014.
- [Lan01] LANE, T.: *Here's one we made earlier*. building.co.uk, 2001.
- [Lan10] LANG, R.: *Origami and Geometric Constructions*. A Tribute to a Mathemagician, 2010.
- [Lav14] LAVILLE, G.: *Écologique, économique et robuste: la première maison en carton est construite à Belle-Île-en-mer*. Castors magazine, 2014.
- [LCZ01] LU, T. J., C. CHEN und G. ZHU: *Compressive Behaviour of Corrugated Board Panels*. Journal of Composite Materials, 35, Dezember 2001.
- [LCZ<sup>+</sup>10] LEIDI, M., M. CHEN, D. ZAUSINGER, J. KUO und T. PAWLOFSKY: *Packed Pavilion*, 2010. Webseite, <http://www.packed-pavilion.blogspot.de>, Abruf am 15.05.2015.
- [Leo08] LEONARD, R.J.: *Manual of Cardboard Construction*. Berkeley Reporter, 1908.
- [McQ03] MCQUAID, M.: *Shigeru Ban*. Phaidon Press, 2003.
- [Min15] MINK, M.: *Architekten entwickeln ein Haus zum Falten*. Die Welt, 2015.
- [Miu96] MIURA, K.: *Mathematik der Form*. ARCH+, 131, 1996.

- [MÖ06] MÄKELÄ, P. und S. ÖSTLUND: *Evaluation of different constitutive models for fracture mechanics analysis of paper materials*. Technischer Bericht, STFI-Packforsk, 2006.
- [Nee93] NEEDHAM, J.: *Paper and Printing*, Band 5 der Reihe *Science and Civilisation in China*. Cambridge University Press, 1993.
- [Nor03] NORDSTRAND, T.: *Basic testing and strength design of corrugated board and containers*. Doktorarbeit, Lund University, 2003.
- [Ohl54] OHL, F.: *Imprägnieren von Papier und Pappe*. Nummer 2 in *Papiertechnische Bibliothek*. Dr. Sändig Verlag, Wiesbaden, 1954.
- [Oli01] OLIGMÜLLER, J.G.: *Papier - Vom Handwerk zur Massenproduktion*. Dumont, 2001.
- [Pin08] PINNINGTON, T.: *The Cold Corrugator*. Official Magazine of Federation of Corrugated Box Manufacturers of India (FCBM), Oktober - Dezember 2008.
- [Poh09] POHL, A.: *Strengthened corrugated paper honeycomb for application in structural elements*. Doktorarbeit, ETH Zürich, 2009.
- [Rod07] RODEWALD, GISBERT: *Brandlehre*, Band 6. Kohlhammer, 2007.
- [SB09] SCHMIDT-BACHEM, H.: *Beiträge zur Industriegeschichte der Papier-, Pappe- und Folien-Verarbeitung in Deutschland*. Universität Tübingen, 2009.
- [SB11] SCHMIDT-BACHEM, H.: *Aus Papier: Eine Kultur- und Wirtschaftsgeschichte der Papier verarbeitenden Industrie in Deutschland*. De Gruyter Saur, 2011.
- [Sch02] SCHRÖTTER, T.: *Funktionsweise von intelligenten Lösungen zur BCT-Wert Berechnung*. Wellpappe Nachrichten, Januar 2002.
- [Sto66] STOBBE, O.: *Aus der Geschichte der Wellpappe*. Papiergeschichte, 1-2, 1966.
- [Sur09] SURYA, E.: *Cardboard Banquet at Cambridge University*, 2009. Webseite, <http://www.pleatfarm.com/2009/11/09/cardboard-banquet-cambridge-university>, Abruf am 15.05.2015.
- [TG01] TRYDING, J. und P. J. GUSTAFSSON: *Analysis of Notched Newsprint Sheet in Mode I Fracture*. Journal of Pulp and Paper Science, 27(3):103–109, 2001.
- [The15] THESSMANN, G.: *Tragverhalten von Papierwerkstoffen*. Seminararbeit, Bauhaus-Universität Weimar, 2015.
- [TL05] TIAN, Y.S. und T.J. LU: *Optimal design of compression corrugated panels*. Thin-Walled Structures, 43(3):477–498, März 2005.
- [Try96] TRYDING, J.: *In-Plane Structure of Paper*. Technischer Bericht, Lund University, Lund / Sweden, 1996.
- [UPM14] UPM: *So entsteht Qualitätspapier*. Broschüre, 2014.
- [Urb90] URBANIK, T. J.: *Edge Crush Testing Correcting for instrumentation with corrugated fiberboard edgewise crush test theory*. Tappi Journal, Seiten 263–268, Oktober 1990.
- [VDP15] VDP: *Papier Kompass 2014*. Verband Deutscher Papierfabriken e.V., 2015.
- [VDW14a] VDW: *Basiswissen Wellpappe*. Verband der Wellpappen-Industrie e.V., 2014.
- [VDW14b] VDW: *Jahresbericht 2014 - Zahlen und Fakten*. Verband der Wellpappen-Industrie e.V., 2014.

- [Wac89] WACHSMANN, K.: *Wendepunkt im Bauen*. Verlag der Kunst Dresden, 1989.
- [Wan09] WANG, D.: *Cushioning Properties of Multi-layer Corrugated Sandwich Structures*. Journal of Sandwich Structures and Materials, Seiten 57 – 66, 2009.
- [Web04] WEBER, T.: *Die Sprache des Papiers*. Haupt, Berne, 2004.
- [Wei08] WEINAND, Y.: *Origami - Folded Plate Structures, Architecture Folding patterns*. In: *10. World Conference on Timber Engineering, Japan*, 2008.
- [Wey05] WEYERHÄUSER, K.: *Faltung und Korrelation kontinuierlicher Signale*. Seminararbeit, Universität Koblenz, 2005.
- [Zei13] ZEIER, F.: *Papier - Versuche zwischen Geometrie und Spiel*. Haupt Berne, 2013.
- [ZFA15] ZFA: *Papierlexikon*. Zentral-Fachausschuss Berufsbildung Druck und Medien, 2015.